

La physique à l'horizon 2030

Stratégie de CNRS Physique

2024



Photo de couverture: Simulation numérique illustrant le processus de l'accélération laser-plasma © Jérôme Faure, Laboratoire d'Optique Appliquée (LOA, CNRS / Ecole Polytechnique / ENSTA Paris)

LA PHYSIQUE À L'HORIZON 2030 STRATÉGIE DE CNRS PHYSIQUE

Sous la direction de Thierry Dauxois, directeur de CNRS Physique

Coordination éditoriale
CNRS Physique

Conception / Maquette
Lauren Puma, chargée de communication CNRS Physique

Juin 2024

Impression
CNRS IFSEM, secteur de l'imprimé



SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	6
ENGAGEMENTS GÉNÉRAUX	8
VOLET 1: THÉMATIQUES SCIENTIFIQUES EN ÉMERGENCE	11
ÉLECTRONIQUE ET PHOTONIQUE AVANCÉES	12
PHYSIQUE EN RÉGIMES EXTRÊMES	14
PHYSIQUE DES SYSTÈMES COMPLEXES	17
PHYSIQUE DE LA MATIÈRE COMPLEXE	19
MATIÈRE, LUMIÈRE ET PROCESSUS QUANTIQUES	21
PHYSIQUE DU VIVANT	24
LOIS FONDAMENTALES	26
NOUVEAUX ENJEUX POUR LES MÉTHODES NUMÉRIQUES	29
VOLET 2: GRANDS DÉFIS SOCIÉTAUX	33
PHYSIQUE POUR LA SANTÉ	34
PHYSIQUE POUR L'ÉNERGIE ET LE CLIMAT	36
PHYSIQUE POUR L'ENVIRONNEMENT, L'URBAIN ET L'ALIMENTATION	38
PHYSIQUE POUR LES TECHNOLOGIES QUANTIQUES ET LES TECHNOLOGIES NUMÉRIQUES	40
VOLET 3: QUESTIONS TRANSVERSES	43
CULTURE SCIENTIFIQUE	44
PARITÉ ET DIVERSITÉ(S)	45
INTÉGRER LES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX À LA RECHERCHE EN PHYSIQUE	46
ACTIONS SPÉCIFIQUES	47

AVANT-PROPOS

Lorsque l'Institut a initié sa prospective au **printemps 2022**, l'engagement avait été pris que ce travail ne serait pas un exercice de style, mais bien un outil d'aide au **pilotage stratégique de CNRS Physique**. Ce cahier de stratégie 2024 est une première étape de la mise en place d'actions spécifiques pour que les thématiques scientifiques émergentes identifiées dans le travail de prospective puissent se concrétiser.

En février 2024, un [document de prospective scientifique](#)¹ de plus de 180 pages a été publié. Ce premier document a été construit à partir du travail considérable de quinze ateliers. Il a nécessité de nombreux échanges impliquant plus d'un millier de physiciennes et de physiciens de l'Institut et au-delà. La structure du document de prospective permet une double lecture des recherches en physique avec un premier volet sur les **thématiques scientifiques en émergence** ayant pour principal objectif une avancée de la connaissance, et un second volet abordant les **grands défis sociétaux** mis en avant par les politiques publiques française et européenne. Enfin, un troisième volet identifie les **questions transverses qui englobent toute la physique, et parfois la dépassent**: parité-égalité, culture scientifique en physique et impact des enjeux environnementaux sur la recherche en physique. Le document que vous avez maintenant sous les yeux, qui définit les grandes lignes de la stratégie de CNRS Physique, garde cette structuration permettant une vision plurielle des recherches en physique.

CNRS Physique veillera à la **poursuite de la recherche soutenue aujourd'hui**. Des questions scientifiques au cœur de nos activités actuelles continueront à se poser, étape après étape, et à mobiliser la communauté de la physique dans les années à venir. CNRS Physique sera attentif à ces questions scientifiques, car la possibilité de poursuivre sur le temps long des recherches fondamentales est la mission principale d'un organisme de recherche comme le nôtre.

En parallèle, il était crucial pour l'Institut d'identifier les questions en émergence et celles susceptibles de conduire aux bouleversements de demain. À partir du travail de chacun des ateliers et de la contribution du Conseil Scientifique de l'Institut, CNRS Physique a identifié des **thématiques à fort impact potentiel**. Bien que ces thématiques n'aient pas nécessairement été présentées comme telles dans le document de la prospective, CNRS Physique a délibérément choisi de les mettre en valeur pour leur importance stratégique. Celles-ci bénéficieront d'une attention particulière dans les années à venir, et leur développement ainsi que leurs progrès seront suivis avec une grande attention. Ce cahier de stratégie identifie explicitement ces problématiques, constituant ainsi un premier engagement de CNRS Physique vis-à-vis de la communauté.

Une politique scientifique ne saurait être conduite sans moyens financiers, humains et opérationnels. Dans un contexte financier contraint, CNRS Physique souhaite néanmoins s'engager pour que ces thématiques à fort impact potentiel puissent se développer. Ce document stratégique présente deux séries d'actions. Nous présentons tout d'abord **les actions spécifiques mises en place en 2023 — 2024**, c'est-à-dire dès les retours des ateliers représentant la communauté scientifique, retours partagés lors d'un colloque tenu mi-septembre 2023. Ces actions de CNRS Physique sont déjà engagées, au moins partiellement. Nous avons ensuite identifié des **actions**

¹ https://www.inp.cnrs.fr/sites/institut_inp/files/download-file/Prospective%20Physique%20VF.pdf

spécifiques 2024 — 2025 qui seront déployées au cours des douze prochains mois.

Année après année, CNRS Physique prendra de nouveaux engagements pour façonner ensemble un avenir où la science, la physique en particulier, jouera un rôle clé dans l'avancement des connaissances fondamentales et la réponse aux défis de demain.

CNRS Physique est conscient de l'importance de concilier ces ambitions pour la recherche de demain avec **une sobriété plus grande**, tant au niveau énergétique qu'en termes de ressources utilisées. La communauté doit collectivement réfléchir, puis se positionner clairement et sans tarder. L'Institut a pleinement conscience du rôle important qui est le sien pour accompagner dans cette démarche les laboratoires et pour coordonner les bonnes solutions proposées.

Enfin, il convient de rappeler que la **bonne atmosphère et la qualité de vie au travail dans les laboratoires restent aujourd'hui nos priorités**. La recherche de haut niveau que l'on ambitionne nécessite la confiance en soi mais aussi le **respect mutuel**. Le temps long pour s'engager sur des thématiques risquées mais à fort potentiel et la dimension collective des activités scientifiques doivent être préservés. Le respect de l'équilibre des vies personnelle et professionnelle, des repos de fin de semaine et les vacances régénératives sont également des valeurs bénéfiques.

Toutes ces valeurs sont gages de conditions favorables à l'épanouissement des personnels afin d'atteindre nos objectifs, aussi élevés soient-ils.

Pour conclure, je tiens à renouveler mes remerciements à toutes les personnes ayant participé au travail des quinze ateliers et aux membres du Conseil Scientifique d'Institut. Je tiens enfin à remercier très chaleureusement l'ensemble de l'équipe de CNRS Physique au sein de laquelle l'enthousiasme et la motivation permanente ont été précieux pour construire ce cahier de stratégie. Chaque membre a contribué personnellement à cette réussite, c'est ce qui fait aussi la force de l'Institut.

Thierry Dauxois

Directeur de CNRS Physique

ENGAGEMENTS GÉNÉRAUX

Soutenir la recherche fondamentale, sur un spectre large de thématiques, par des approches expérimentales, numériques et théoriques.

Amplifier l'impact des recherches en physique sur la société et accompagner les projets qui peuvent conduire à des innovations de rupture et à de la valorisation.

De manière à préparer l'horizon 2030, **CNRS Physique a élaboré une liste de thématiques scientifiques avec un fort impact potentiel**, en s'inspirant des textes rédigés par la communauté. Pour chaque atelier des volets 1 et 2, elles sont indiquées juste après le résumé scientifique issu du document de la prospective 2024. Il est important d'assurer leurs développements harmonieux par des postes, des financements, des GDR... Nous aurons donc la responsabilité de les suivre dans les années à venir, et notamment jusqu'à la prochaine campagne de prospective de l'Institut. Pour prendre l'exemple des recrutements, s'ils n'ont pas lieu naturellement, nous interviendrons en coloriant des postes (CRCN, DR-Ext, CPJ). Nous envisageons de consacrer ainsi de l'ordre de 20% des postes sur des thématiques de ce type. En ce qui concerne les financements, nous pourrions utiliser le nouveau programme de Recherche à Risque.

Certaines thématiques nécessitent une action ponctuelle sans tarder, sur les volets 1 et 2, mais aussi sur le volet 3 plus transverse. Nous avons commencé à le faire depuis le colloque de restitution de septembre 2023. Ces propositions sont regroupées dans la dernière partie du document présentant les **actions spécifiques mises en place en 2023 — 2024 et celles que nous initierons dès 2024 — 2025**.

Ces deux listes d'actions ne constituent bien évidemment qu'une très petite partie des actions soutenues par l'Institut. À travers les dotations des laboratoires, les frais d'infrastructures, les appels à projet, les actions à l'international, les actions de valorisation et bien sûr les recrutements des différentes catégories de personnel, l'Institut a un rôle essentiel de soutien de la recherche française. Ces actions spécifiques n'en demeurent pas moins cruciales pour préparer le futur à l'horizon 2030.

Nous avons également décidé de consacrer un **encart spécial à la problématique des matériaux**, pour en rappeler le rôle fondamental et transversal en physique aujourd'hui et encore plus demain. CNRS Physique a ainsi été l'un des Instituts à l'initiative d'un axe transverse prioritaire sur les matériaux dans le Contrat Objectifs Moyens Performances 2024 — 2028 du CNRS ainsi que d'un autre **axe transverse prioritaire sur l'instrumentation sans limite** qui est au cœur des avancées scientifiques de notre discipline.

CNRS Physique va créer un poste de **Délégué Scientifique « IT & Plateformes »** qui aura la responsabilité du suivi et de la prospective des métiers d'accompagnement de la recherche au sein des laboratoires et des plateformes de l'Institut. Identifier les expertises et compétences stratégiques, mieux anticiper les évolutions nécessaires de ces métiers notamment ceux en tension, pour répondre aux enjeux qui émergent de la prospective de l'Institut, seront les lignes de force de cette mission.

En ce qui concerne l'instrumentation, CNRS Physique est conscient de l'importance des grandes

infrastructures de recherche pour la recherche en physique, avec une attention particulière à l'accessibilité des sources de neutrons pour la communauté française.

Par ailleurs, CNRS Physique souhaite **créer des équipes projets** permettant de fédérer de petites équipes, sur des thématiques émergentes pour favoriser de nouvelles synergies, avec des montants alloués typiques de l'ordre de 25 k€/an, pour des périodes de 2 à 4 ans. Une attention spéciale concernera les projets interdisciplinaires ou pluridisciplinaires, qui ne sont aujourd'hui que difficilement financés par l'ANR. Nous allons aussi agir pour inciter l'ANR à mieux accompagner ce type de projets scientifiques.

CNRS Physique souhaite en particulier renforcer la place de la physique dans les programmes et actions interdisciplinaires en **promouvant l'usage de la modélisation physique et ses spécificités**, telles que l'élaboration de modèles minimaux pour identifier les mécanismes dominants d'un phénomène ou l'articulation multi-échelles de modèles établis à différents niveaux de description.

Enfin, CNRS Physique souhaite **renforcer sa politique internationale**. La part du budget dédiée aux actions internationales par l'Institut a été augmentée de plus de 10% en 2024, répartie sur tous les dispositifs de coopération du CNRS. Parmi eux les *International Research Laboratories* (IRL), outils particulièrement originaux, sont au cœur de notre stratégie. Outre celui de Singapour qui fête ses 10 ans, l'Institut en a créé récemment quatre: à Sherbrooke, Tokyo et Tsukuba en 2022 et le dernier à Santa Barbara en 2023. CNRS Physique planifie aussi des visites en amont au XFEL de Hambourg, aux Etats-Unis, en Inde, en Argentine et au Brésil pour les douze prochains mois. Ce réseau à l'étranger a non seulement vocation à structurer nos échanges scientifiques sur la durée avec ces pays mais aussi à permettre des mobilités, prolongées, de scientifiques afin de développer de nouvelles collaborations approfondies et fructueuses, sans pour autant multiplier les déplacements. Contrats doctoraux et délégations pour les enseignants-chercheurs seront prioritaires pour ces destinations. Une meilleure information sur ces possibilités sera faite et accompagnée d'un appel à candidature régulier. De la même manière, nous soutiendrons les séjours de chercheurs invités. Enfin, une réflexion devra être menée pour avoir davantage de poids au niveau européen et orienter les thématiques de demain.

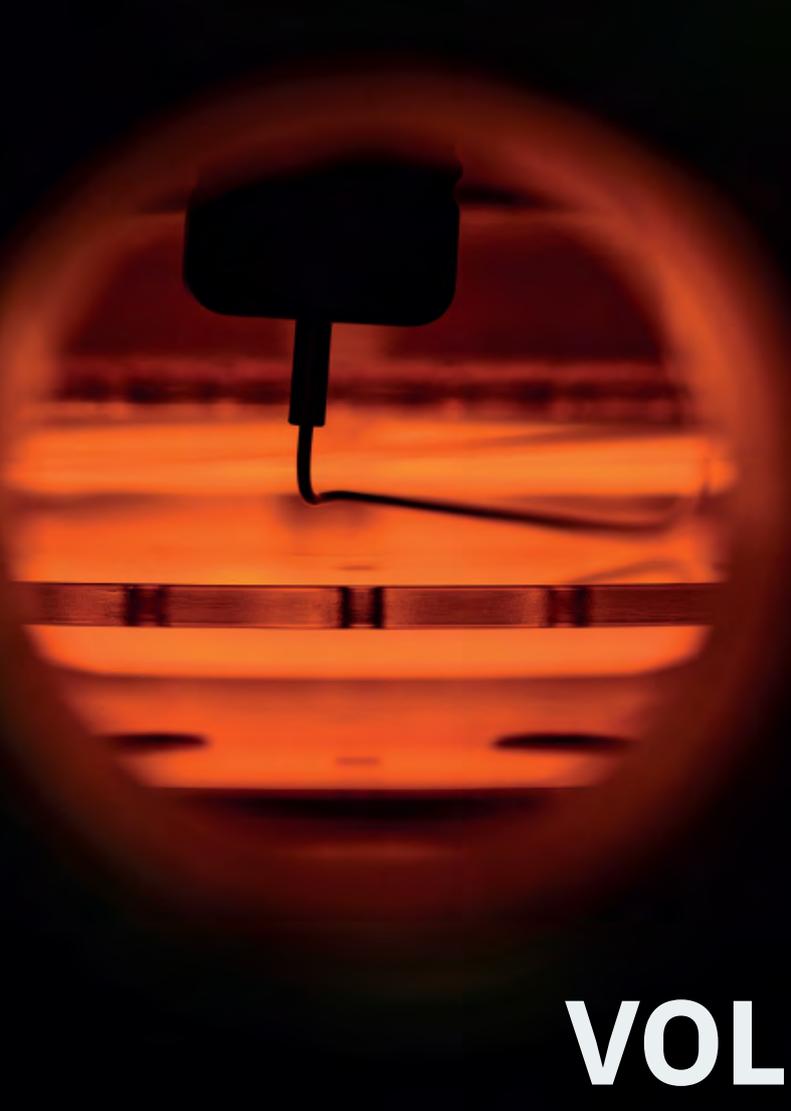
Ci-contre;

Croissance de graphène sur un substrat métallique, à 1050 °C © Cyril FRESILLON / C2N / CNRS Images

Lévitiation d'un aimant placé au dessus d'une pastille de supraconducteur cuprate © Julien BOBROFF/CNRS Images

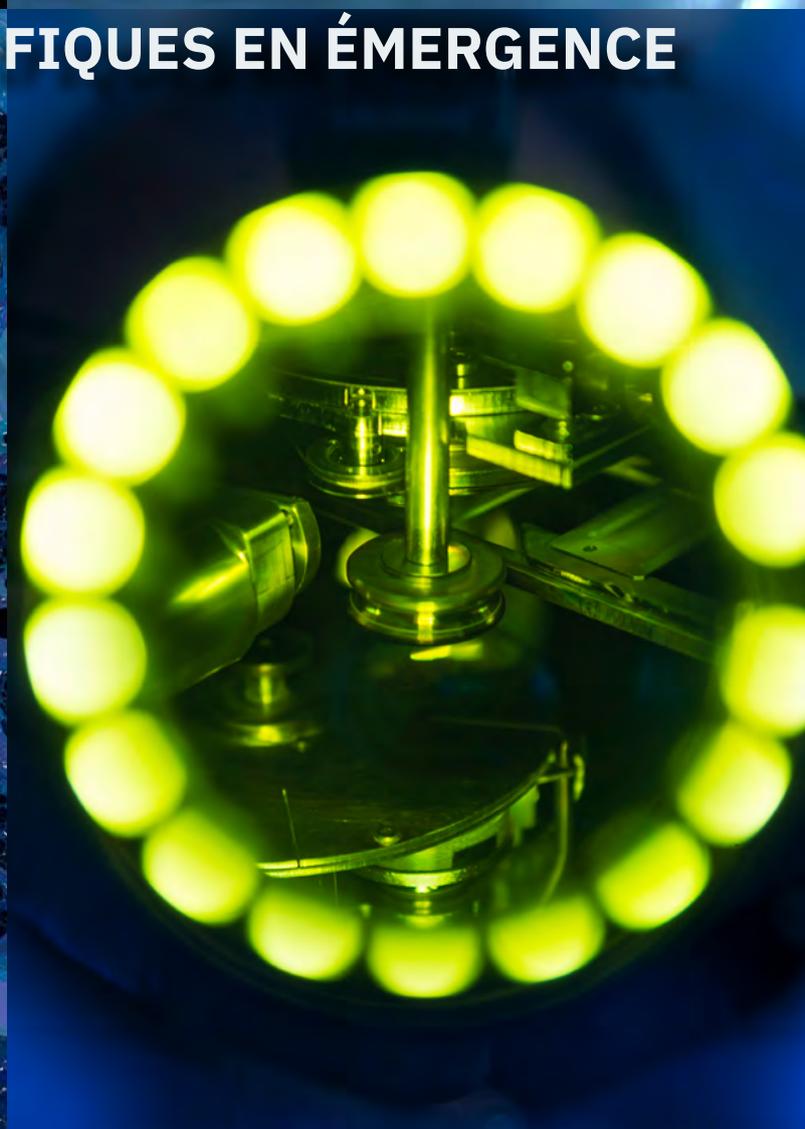
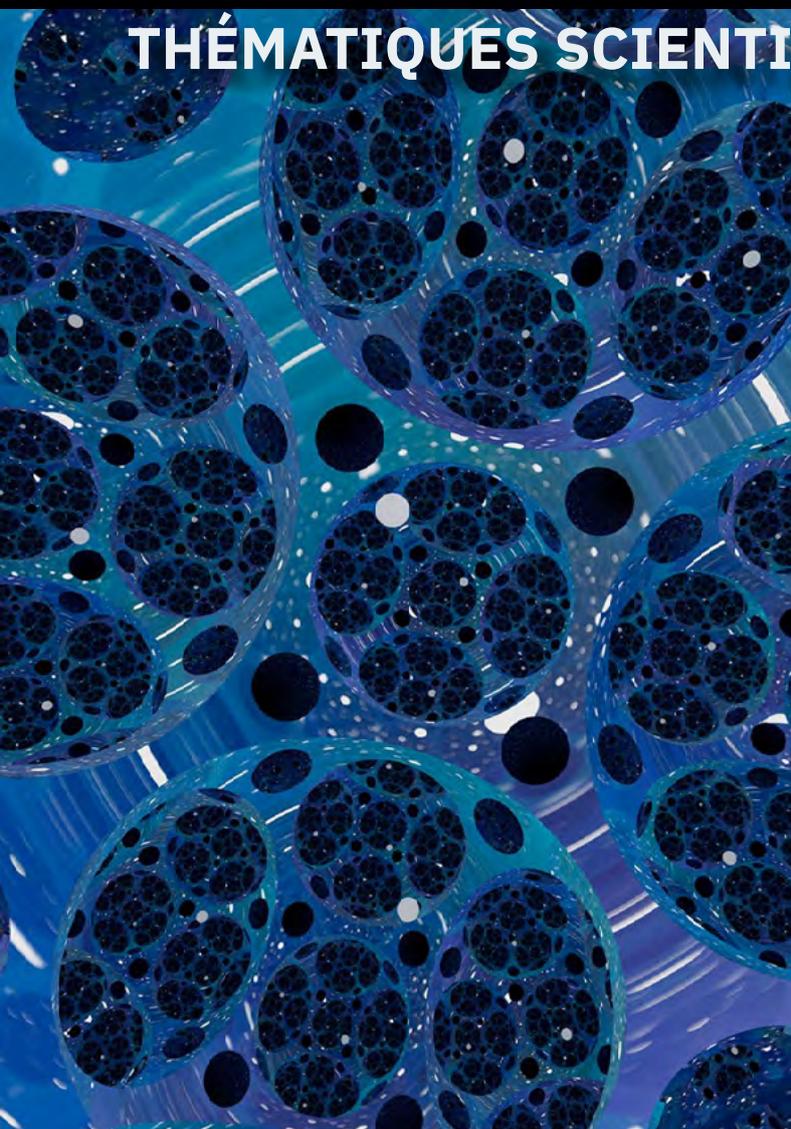
Bleu hyperbolique © R. COULON/S. MATSUMOTO/H. SEGERMAN/S. TRETTEL/IRMAR/GeorgiaTech/OSU/Stanford University/CNRS Images. Licence CC BY-NC-SA 4.0

Carrousel de cibles d'un bâti d'ablation laser © Cyril FRESILLON / UMPy CNRS-Thales / CNRS Images



VOLET 1

THÉMATIQUES SCIENTIFIQUES EN ÉMERGENCE



ÉLECTRONIQUE ET PHOTONIQUE AVANCÉES

Résumé

L'électronique, la photonique, la phononique et la science des matériaux sont des thèmes de recherche qui connaissent des évolutions fortes et rapides pavant le chemin de la physique vers 2030. L'approfondissement de nos connaissances dans ces domaines ouvrira la voie à d'importantes avancées fondamentales et à de potentielles innovations de rupture.

Dans le domaine de l'électronique, les matériaux topologiques, les matériaux de van der Waals et la physique mésoscopique suscitent un vif intérêt, avec de nombreuses questions fondamentales et des avancées majeures attendues dans les prochaines années. Le magnétisme et la spintronique ouvriront de nouvelles perspectives, en particulier dans l'étude des ordres magnétiques, des textures de spin, de la dynamique d'aimantation et des phénomènes d'interconversion. L'électronique organique et moléculaire requiert quant à elle une compréhension approfondie des interfaces et des mécanismes de transport de charge à l'échelle moléculaire. Enfin, de nouveaux paradigmes de calcul émergent pour répondre aux besoins futurs de l'électronique.

En ce qui concerne la photonique, les progrès dans les fibres optiques et les sources de puissance ouvrent de nouvelles perspectives de recherche. Il s'agit aussi de développer des circuits photoniques hybridant de nombreux matériaux et composants pour combiner différentes fonctionnalités. En nanophotonique se développent des nano— voire pico— cavités optiques pour exalter l'interaction lumière-matière. Les métasurfaces se déploient dans des dispositifs optiques et optoélectroniques, leur fabrication large échelle devenant un enjeu majeur, tandis que des métasurfaces actives, dynamiques et reconfigurables sont à explorer. Un champ de recherche vise à étudier l'influence du degré de désordre des surfaces nanostructurées sur les propriétés optiques et le contrôle des ondes. Enfin, l'acousto-optique étudie le couplage phonons-photons pour des oscillateurs nano-optomécaniques intégrés et hybrides. En phononique, les défis incluent la compréhension du transport de chaleur à petite échelle, en particulier dans des milieux complexes et confinés, ainsi que le transport de chaleur dans des nano-objets et les interactions phonon-interface. De plus, l'effet thermique et thermoélectrique dans les matériaux innovants offre des perspectives prometteuses pour des applications en thermoélectricité et en récupération d'énergie. Les matériaux de demain incluent notamment les matériaux 2D, les semi-métaux de Dirac, les composés organiques, les oxydes fonctionnels, les matériaux à changement de phase, les métamatériaux à base d'oxydes, ainsi que leur hybridation. La durabilité et le respect de l'environnement sont des préoccupations croissantes, tout comme la mise à l'échelle des matériaux et la nanostructuration. La conception inverse, l'intégration multi-échelle et la convergence des technologies sont des aspects clés. Pour progresser, il est également nécessaire de développer de nouveaux procédés de synthèse et d'hybridation, ainsi que des outils de modélisation et de caractérisation. Ces derniers combineront les mesures spatiales, spectrales et temporelles en repoussant les limites de résolution, et s'orienteront vers des mesures simultanées

multi-stimuli, multi-paramètres ou *operando*. L'intelligence artificielle (IA) accélère la conception inverse et la co-conception des matériaux et dispositifs, avec des questions subsistant quant à l'évaluation des résultats et la faisabilité expérimentale. Enfin, la multidisciplinarité sera essentielle pour aborder les questions communes à la physique, à l'algorithmique, au traitement du signal, à la bioinspiration...

Thématiques à fort impact potentiel

dont le développement devra faire l'objet d'une attention particulière dans les années à venir.

Dans le domaine de l'électronique et de la photonique, les travaux de la prospective ont conduit CNRS Physique à identifier trois enjeux importants, vis-à-vis desquels il conviendra d'être particulièrement attentif dans les années à venir.

Le défi majeur de l'électronique et plus généralement du numérique est de réduire significativement son impact environnemental et son empreinte carbone. Malgré un contexte de croissance importante et régulière du secteur qui consommera 15 à 20 % de la production mondiale d'électricité en 2030, la recherche en électronique n'a pas encore pleinement intégré ce changement de paradigme. Il conviendra donc d'amplifier les efforts pour développer une électronique basse consommation dont la frugalité deviendra un critère de performance essentiel. Cette ambition passera non seulement par l'optimisation de la consommation énergétique des technologies actuelles, mais aussi par l'exploration de véritables ruptures conceptuelles s'appuyant sur la convergence de technologies émergentes (neuromorphique, quantique, spintronique...) afin de développer de nouvelles architectures et composants associés pour le calcul et le stockage de l'information.

Dans le domaine de la photonique, les avancées des circuits intégrés reposent sur la compréhension et l'exploitation des interactions lumière-matière aux échelles sub-longueur d'onde et sur l'amélioration des matériaux et des procédés technologiques. Afin de répondre aux enjeux des technologies de l'information et du quantique, il sera essentiel de développer des circuits photoniques intégrant et hybridant de nombreux matériaux et composants, en mariant intégrations passive et active de fonctions.

Un autre enjeu est de développer la convergence électronique-photonique. Des interfaces existent entre l'électronique et la photonique mais doivent être renforcées en s'appuyant sur une recherche orientée vers de nouveaux concepts exploitant l'hybridation des propriétés physiques et la multifonctionnalité. Cette convergence aura des répercussions certaines dans les télécommunications via le développement d'antennes actives et reconfigurables adaptées à la montée en fréquence, ou l'implémentation des interconnexions optiques sur puce électronique.

PHYSIQUE EN RÉGIMES EXTRÊMES

Résumé

Les régimes extrêmes sont un outil puissant de compréhension de la matière, un terrain propice aux découvertes, le catalyseur d'applications technologiques ainsi qu'un formidable défi intellectuel et technique.

Dans la prochaine décennie, les phénomènes ultrarapides (picoseconde à attoseconde) seront à même de sonder les échelles spatiales du nm — voire les objets nanométriques uniques — tout en gardant une sensibilité quantique aux relaxations des quasi-particules. L'enjeu pour 2030 est de contrôler de manière cohérente les propriétés de la matière grâce à des impulsions multiples couvrant une large gamme spectrale (notamment le THz non linéaire) et temporelle.

Trois axes se dégagent dans le domaine de la cryogénie: les plus basses températures aideront à repousser les frontières de la connaissance (fluides quantiques, résonateurs électromécaniques, interaction électron-noyau...), l'association à d'autres conditions extrêmes se généralisera pour comprendre les matériaux quantiques et enfin de nouvelles plateformes visant des puissances frigorifiques extrêmes émergeront pour l'ordinateur quantique (et toute l'ingénierie associée).

Les progrès des dispositifs continus et pulsés de champs magnétiques intenses bénéficieront à l'astrophysique de laboratoire, la magnétohydrodynamique ou la magnétoscience. Couplés à d'autres variables extrêmes et/ou à des sondes de plus en plus sophistiquées (imageries optiques, microscopies de champ proche, électronique haute fréquence, techniques ultra-rapides), ces progrès impacteront fortement la recherche sur les matériaux quantiques. Les nouvelles bobines en supraconducteurs à haute température promettent de réduire le volume des tokamaks pour la fusion thermonucléaire, mais permettront aussi des expériences novatrices à temps de comptage très long en matière condensée ou en physique des particules (recherche de matière noire notamment).

La physique des lasers intenses promet de nombreuses évolutions à l'horizon 2030. Grâce à l'installation laser femtoseconde Apollon, fiabilisée, poussée jusqu'à des puissances crête de 10 PW et couplée à de nouveaux types d'accélérateurs, les processus fondamentaux de l'électrodynamique quantique comme la création de paires électrons-positons ou d'autres particules/interactions dans le vide pourront être étudiés expérimentalement et être confrontés aux différentes théories d'électrodynamique quantique à champ fort. Associer des lasers de haute énergie dont la durée d'impulsion est plus longue (> 1 kJ-ns) à des diagnostics innovants (souvent produits à partir de sources issues d'Apollon, des XFEL, des synchrotrons ou par des lasers de haute énergie) permettra d'étudier les chocs radiatifs et les processus d'accrétion et d'éjection propres à l'astrophysique-plasma mais aussi en physique des très hautes pressions (> 10 Mbar) à des températures de l'ordre de 10 000 K. Cela permettra d'étudier des matériaux des intérieurs exoplanétaires ou d'accéder à des propriétés remarquables de la matière dans des domaines encore

inexplorés. À plus basse température, les hautes pressions resteront l'apanage des enclumes de diamant, qui seront de plus en plus associées à des diagnostics performants (XFEL, synchrotrons...). Les installations laser de très haute puissance seront aussi des outils privilégiés pour explorer et fiabiliser de nouveaux accélérateurs de particules (électrons/ions/ neutrons) et sources de rayonnement compactes avec des propriétés uniques, pouvant notamment être utilisés dans des installations laser hybrides combinant 10 PW-fs et 10 kJ-ns. Pour la fusion (par confinement magnétique, FCM, ou inertiel, FCI), des progrès viendront notamment du développement de nouveaux diagnostics, entre autres pour comprendre les conditions des interactions aux bords (FCM), l'absorption anormale (FCI) ou les instabilités hydrodynamiques et les turbulences.

Thématiques à fort impact potentiel

dont le développement devra faire l'objet d'une attention particulière dans les années à venir.

Les conditions extrêmes de température, de champs magnétique et électrique, de pression et d'échelles temporelles recouvrent naturellement une multitude de domaines de la physique: plasmas (où le mot « extrême » est consubstantiel à la définition de l'objet), matériaux quantiques dans les régimes non standards qui développent des comportements inédits, phénomènes géo ou astrophysiques. CNRS Physique a identifié trois axes de développements prioritaires pour encourager l'exploration scientifique de ce domaine naturellement pluridisciplinaire.

Tout d'abord, il faut encourager la conception d'expériences capables de solliciter de façon intense plusieurs réponses physiques simultanément. En effet, dans nombre de cas, le régime extrême se manifeste via la combinaison de plusieurs des paramètres cités ci-dessus. Par exemple, associer les plasmas produits par laser avec les très hautes pressions ou avec les champs magnétiques externes intenses permet l'exploration de phases solides/condensées totalement inconnues d'objets astrophysiques ou d'étudier les plasmas magnétisés omniprésents dans l'Univers. Un autre exemple serait d'associer les basses températures avec les champs magnétiques intenses et les hautes pressions, ce qui rendrait accessible l'étude de processus très fondamentaux dans les matériaux quantiques. Dans cet objectif, l'implantation des systèmes de conditions extrêmes auprès des grands instruments (laser, synchrotrons, XFEL) a commencé et va se poursuivre *crescendo*.

Par ailleurs, pouvoir accéder à ces régimes extrêmes implique en général des moyens expérimentaux conséquents et nécessite de pousser l'instrumentation à ses limites. Les progrès des installations de champs magnétiques intenses (en termes de champ maximal, de volume de champ disponible, de compromis champ maximal/durée de pulse et de fiabilité) vont impacter de nombreux domaines de la physique dans la prochaine décennie. La cryogénie ultime va rendre accessible l'étude des mécanismes les plus fondamentaux de la physique de la matière condensée. L'évolution des systèmes laser vers des gammes spectrales plus étendues, vers des cadences et des énergies plus élevées va permettre la mise en place d'expériences pompe-sonde résolues en temps (fs) à base de STM, ARPES, EELS ou TEM (multi-échelles spatiales) qui sera une étape déterminante pour accéder et utiliser des structures transitoires ultrabrèves. Cela va aussi permettre le couplage de faisceaux haute énergie-haute puissance qui sera décisif pour espérer atteindre des schémas viables de fusion inertielle, et fera avancer de manière significative de nombreux sujets en astrophysique et planétologie.

Finally, important efforts will be made to continue to extend the spectral/energetic and temporal domains of secondary radiation and energetic particles from laser-matter interaction. THz, X and gamma radiations as well as ultrashort particle beams will allow exploring, imaging and controlling new states in matter. These sources will also provide access to interaction regimes hitherto inaccessible experimentally, in particular strong-field quantum electrodynamics, which simultaneously involves relativistic and quantum processes.

PHYSIQUE DES SYSTÈMES COMPLEXES

Résumé

Le climat et l'environnement sont des systèmes complexes typiques, pour la compréhension desquels la physique a un rôle central à jouer. La physique statistique permettra de caractériser les phénomènes extrêmes causant d'importants dommages (canicules, crues, tremblements de terre, avalanches), évaluer leurs risques et prédire leur impact sur différents réseaux couplés (énergie, communications, réseaux sociaux, économiques ou financiers). La physique non linéaire sait décrire les phénomènes de multi-stabilité et les bifurcations, et participer à la paramétrisation des petites échelles du climat via, par exemple, l'étude de l'interaction ondes-atmosphère ou de l'agrégation des nuages.

En turbulence, une question importante concernera les échelles plus grandes que l'échelle d'injection (pour par exemple savoir à quel point elles sont à l'équilibre statistique) et les échelles sous-diffusives (rôle des singularités et du bruit). On s'intéressera aussi aux régimes non-stationnaires ou non-homogènes, tels que le couplage plancton-turbulence dans la circulation océanique. Mieux comprendre la turbulence d'ondes forte et la turbulence convective permettra d'améliorer respectivement les modèles océaniques et ceux de la formation des nuages ou de l'interaction glace-eau de mer.

La dynamique des écosystèmes implique des échelles très variées qu'il faudra observer et modéliser en élucidant les effets de mémoire, les mécanismes de sélection et d'acquisition (ou de modification) de fonctions biologiques ou écosystémiques, et en distinguant le rôle des contraintes extérieures et celui des interactions entre individus ou entre espèces.

L'émergence d'expériences de physiciens sur des systèmes modèles de matière active, de matière informée, de matière programmable ou de systèmes inter-espèces sera un apport majeur pour comprendre des systèmes et des interactions de plus en plus hétérogènes et complexes, et à terme les contrôler. Le couplage entre la motilité des particules actives et leur écoulement complexe est à élucider. Les progrès expérimentaux pourront permettre le transfert en temps réel d'informations de plus en plus complètes du niveau micro vers le niveau macro et en retour une action sur le micromonde.

Des techniques de mesures nouvelles vont émerger, utilisant des particules changeant de couleur selon les propriétés locales (cisaillement, vorticité, pH), ou des avancées en mesures ultrarapides. Les réseaux de neurones biologiques pourront inspirer de nouveaux types dits neuromorphiques d'ordinateurs ou de caméras, sélectionnant les informations pertinentes dès l'acquisition des images.

Concevoir des villes moins énergivores, saines et limitant la ségrégation sociale requiert de comprendre l'évolution des structures urbaines et les dynamiques collectives humaines, qu'elles soient sociales ou physiques (réseaux de transport, foules), tout en replaçant la ville dans un

cadre plus large.

La théorie des systèmes hors-équilibre devra aller vers des systèmes, des interactions, voire des réseaux de plus en plus complexes et couplés (par exemple réseaux de transport et épidémies), et identifier le cas échéant de nouvelles classes d'universalité. Aux échelles quantiques, le couplage entre stochasticité et intrication, l'effet des mesures et des transitions de phase induites ou l'hydrodynamique fluctuante de gaz de particules quantiques sont à explorer par la théorie et l'expérience.

Des défis liés aux ordinateurs du futur tels l'approche de la limite de Landauer ou la gestion de bits en environnement très bruité pourront être abordés par la thermodynamique stochastique et son approfondissement par des expériences modèles (démons de Maxwell biologiques ou synthétiques).

L'intelligence artificielle (IA) peut apporter beaucoup: analyse de données (spectaculaire en dynamique des foules), développement de modèles par des méthodes inverses (en particulier pour le vivant), paramétrisations sous-maille en turbulence. En retour, physique statistique et physique non-linéaire peuvent contribuer à la création d'algorithmes plus efficaces et plus sobres (s'inspirant par exemple du cerveau), et à une reprise de contrôle sur la boîte noire qu'est souvent l'IA (analyse des mécanismes d'apprentissage, auto-évaluation de la fiabilité des résultats et régulation des *fake news*, compréhension des dynamiques d'opinions et des risques pour la démocratie), dans un dialogue fécond avec les neurosciences.

Thématiques à fort impact potentiel

dont le développement devra faire l'objet d'une attention particulière dans les années à venir.

Dans ce domaine vaste et interdisciplinaire de la physique des systèmes complexes, CNRS Physique a identifié deux interfaces avec les sciences humaines et sociales et les sciences de l'environnement qu'il souhaite développer et dès à présent soutenir.

La première est la physique des systèmes sociaux, avec par exemple la prédiction des mouvements de foules, la mesure, l'étude expérimentale et la modélisation des multiples comportements collectifs de la matière active ou de la matière programmable, ou encore la physique des villes et des réseaux urbains pour concevoir des fonctionnements et des évolutions durables. Elle inclut aussi la prédiction des événements rares (crises financières et/ou économiques, catastrophes naturelles, etc.) et l'évaluation des risques associés. L'enjeu est alors d'améliorer la prédiction de ces phénomènes extrêmes, dont le caractère atypique rend inexploitable les modèles de comportement moyen.

La seconde interface concerne la physique des systèmes environnementaux, avec par exemple l'étude des points de bascule climatiques ou écologiques, la dynamique des populations à différentes échelles, la physique des interactions écologiques entre individus ou entre espèces, l'auto-organisation des paysages et des environnements, ou encore la robustesse et la résilience des écosystèmes. La physique peut jouer un rôle central sur ces questions interdisciplinaires, à travers la science des réseaux développée en physique statistique, ou l'intelligence artificielle couplée aux modélisations multi-physiques et/ou multi-échelles.

PHYSIQUE DE LA MATIÈRE COMPLEXE

Résumé

Historiquement centrée autour de la matière molle, la matière complexe s'est largement diversifiée depuis une dizaine d'années, s'intéressant à une très grande variété d'objets à toutes les échelles, du moléculaire au macroscopique. Ces objets ont des origines variées, allant de la science des matériaux jusqu'au vivant, et posent des questions de structure, de dynamique, à la frontière avec beaucoup d'autres disciplines.

Les toutes petites échelles sont celles où les effets chimiques, moléculaires, voire quantiques jouent un rôle clé, pouvant exercer une influence notable aux échelles plus grandes. De nouveaux outils et concepts sont en plein développement, et les effets de confinement observés à ces échelles pourraient avoir des retombées dans le cadre de la physique fondamentale et dans de nombreuses applications.

La question de la remontée des échelles combinant le passage du microscopique au mésoscopique, et du mésoscopique au macroscopique, est un enjeu majeur de la physique de la matière complexe. Ces liens entre les échelles ouvrent en particulier la voie pour aller au-delà de la phénoménologie de certains modèles macroscopiques, intégrer le rôle du désordre, et aborder la transition entre systèmes sensibles aux fluctuations thermiques et systèmes athermiques. Si dans le passé de nombreux phénomènes ont été bien compris lorsqu'ils étaient pris de façon isolée (changement de phase, transfert thermique, mécanique), la prise en compte des couplages multiphysiques, où la complexité résulte de la forte sensibilité de ces couplages souvent non linéaires, représente un défi pour l'avenir.

Les équations étant établies, les simulations numériques sont ici un outil puissant en plein essor, ouvrant de nouvelles possibilités. Face à un espace des phases extrêmement vaste, dont l'exploration complète est inenvisageable, les approches physiques de simplification, typiques de la matière complexe, sont particulièrement efficaces et complémentaires des approches numériques.

Un autre défi porte sur l'élaboration de nouveaux matériaux aux structures contrôlées permettant de nouvelles fonctions à la demande. La recherche autour des métamatériaux aux propriétés statiques et dynamiques étonnantes est l'objet d'un foisonnement créatif remarquable.

Enfin, la physique de la matière complexe est centrale pour aider à la compréhension du vivant et s'en inspirer. Étudier la dynamique et les mécanismes en jeu dans le vivant fournira des perspectives précieuses pour la conception de nouvelles technologies et de nouveaux matériaux.

Déjà actuellement, et plus encore dans l'avenir, la physique de la matière complexe est une physique à l'interdisciplinarité assumée avec de forts liens avec la chimie, la biologie ou les géosciences. Un second point commun entre ces défis est leur proximité avec les enjeux socié-

taux modernes, que ce soit la santé ou la transition énergétique. Le va-et-vient continu entre la volonté de répondre à des questions pratiques et le développement de questions fondamentales nouvelles est une caractéristique forte de la communauté.

Thématiques à fort impact potentiel

dont le développement devra faire l'objet d'une attention particulière dans les années à venir.

La physique de la matière complexe est un domaine de recherche vaste et fascinant qui explore de nombreux sujets. Dans ce contexte, CNRS Physique a identifié trois axes de développement prioritaires parmi les nombreuses perspectives de recherche. Ces axes promettent des avancées significatives dans la compréhension des phénomènes complexes qui nous entourent.

D'une part, de nombreuses recherches vont tendre à renforcer notre compréhension du vivant pour s'en inspirer. Cette thématique inclut de nombreux enjeux de biomimétisme et de biomécanique, en lien avec le développement de solides actifs et de matériaux biologiques à structure interne complexe. La physique des plantes présente des sujets encore peu explorés, tels que le transport de l'eau, l'évolution des formes et les réponses aux stimuli externes. Ces avancées promettent de révolutionner notre approche des structures biologiques complexes.

D'autre part, la recherche sur le comportement de la matière aux échelles nanométriques, en particulier aux interfaces liquide/solide, est aujourd'hui un domaine émergent d'une grande importance. Les récentes avancées expérimentales nous permettent d'explorer les caractéristiques uniques de l'écoulement de la matière à ces échelles, mettant en lumière l'influence des effets de taille finie, des fluctuations et des forces intermoléculaires, associés au rôle prépondérant des surfaces. Des effets originaux liés à la présence de parois sont en particulier observés à la surface de particules micro ou nanométriques, ou en situation d'écoulements ultraconfinés, qu'ils soient technologiques ou naturels. Ils ouvrent de nouvelles perspectives à de nombreuses applications dans les domaines de la filtration ou de la purification.

Finalement, un défi important concerne l'élaboration de nouveaux matériaux aux structures contrôlées permettant de nouvelles fonctions à la demande. Ainsi, la recherche en biomimétisme et autour des métamatériaux mécaniques ou des solides actifs avec des propriétés statiques et dynamiques étonnantes sera l'objet de nouveaux travaux importants. Par exemple, le développement de matériaux architecturés artificiels avec une méso-architecture interne contrôlée ouvrira la voie vers de nouveaux matériaux programmables.

MATIÈRE, LUMIÈRE ET PROCESSUS QUANTIQUES

Résumé

Les matériaux quantiques sont caractérisés par des phénomènes collectifs électroniques. Les progrès récents selon plusieurs axes fondamentaux de leur étude ouvrent une nouvelle ère qui sera particulièrement prolifique. Le premier axe est la production de matériaux de qualité. L'exploration indispensable de nouvelles familles de matériaux s'accélérera via l'utilisation de techniques numériques notamment d'apprentissage statistique. Cette exploration sera complétée par la croissance améliorée de matériaux artificiels, des hétérostructures en feuillets dits de van der Waals, à l'épitaxie couche par couche. Du côté de la théorie, approches numériques réalistes et résolutions de modèles simplifiés se rejoindront et permettront une prédiction quantitative des propriétés de matériaux quantiques. En parallèle, le spectre d'états accessibles s'élargira grâce aux nouvelles capacités de contrôle des matériaux. Par exemple un couplage fort voire sélectif à une cavité optique permettra de réaliser des états exotiques hors d'équilibre. De telles techniques issues du développement de circuits quantiques s'adapteront au champ des matériaux quantiques. Ces progrès s'accompagneront du développement de nouvelles techniques expérimentales en particulier à hautes résolutions spatiale et temporelle. Une complexité croissante de la caractérisation des états de la matière se dessine et, au vu de l'éventail quasi infini de matériaux disponibles, naturels ou artificiels, de nouveaux états exotiques seront très certainement mis à jour. De nouveaux progrès sont escomptés dans la compréhension des phases supraconductrices, magnétiques, et des phases ordonnées topologiquement. Ces dernières incluent les liquides de spins ou les supraconducteurs topologiques, et sont caractérisées par des excitations exotiques telles que les états de Majorana ou des quasi-particules non-abéliennes. Le caractère exotique de ces excitations requiert de nouvelles stratégies d'observation. L'utilisation de circuits cohérents de phase pour caractériser et manipuler ces excitations s'amplifiera. De même, l'étude du transport quantique de la chaleur et de la thermodynamique des systèmes quantiques est en plein essor. En parallèle, les circuits hybrides comportant des résonateurs supraconducteurs devraient permettre un couplage fort à des objets quantiques individuels. D'autres systèmes hybrides mésoscopiques tels que les systèmes optomécaniques opèrent aujourd'hui dans le régime quantique, l'interaction optomécanique permettant à la fois de préparer des états non classiques du champ électromagnétique et de refroidir un mode mécanique jusqu'à son état fondamental.

Par ailleurs, les 30 dernières années ont vu une transformation spectaculaire de la physique atomique, moléculaire et optique, grâce à des percées expérimentales dans le contrôle de la matière par la lumière, et de la lumière elle-même. Depuis le refroidissement et le piégeage d'atomes par laser, le contrôle quantique atteint aujourd'hui permet de disposer d'atomes, de molécules et d'ions ultra-froids, susceptibles d'être interrogés et contrôlés avec précision. Cette discipline a atteint une situation enviable où les protocoles historiquement démontrés avec des atomes alcalins, très sensibles à l'excitation par laser, sont désormais adaptés avec succès à des es-

pèces atomiques et moléculaires de plus en plus variées. La maturité dans la compréhension des phénomènes fondamentaux à l'œuvre, dans le rôle primordial de la structure électronique des atomes et molécules, et dans les sources laser disponibles permet d'envisager l'avenir de cette thématique sur des champs encore plus vastes, au-delà de la seule communauté de la physique atomique et moléculaire. À travers les enjeux autour des mesures de précision et de nouvelles formes de spectroscopie, ce sont toutes les potentialités de cette discipline que nous avons souhaité mettre en avant. La simulation quantique, qui reproduit à l'aide de systèmes expérimentaux contrôlés des hamiltoniens modèles, joue un rôle remarquable de ce point de vue. Initialement réalisée avec des gaz d'atomes froids, elle s'étend à des systèmes de matière condensée, des condensats d'excitons-polaritons aux moirés dans les hétérostructures twistées. Tirant parti de la variété des atomes et molécules diatomiques pour simplifier les protocoles, elle permettra de passer du simulateur au calculateur quantique, afin d'aborder des hamiltoniens plus complexes, incluant notamment le couplage entre topologie, interactions et désordre. Alors que la simulation quantique s'inspire traditionnellement de problèmes de matière condensée, elle vise désormais d'autres domaines de la physique, de la physique des hautes énergies à la gravité analogue.

Thématiques à fort impact potentiel

dont le développement devra faire l'objet d'une attention particulière dans les années à venir.

À partir des conclusions de l'atelier « Matière, Lumière et Processus Quantiques », CNRS Physique a identifié quatre problématiques principales auxquelles il conviendra de porter une attention soutenue. Les matériaux quantiques présentent des ordres multiples et parfois concurrents (ordres de spin, orbital et charge) ainsi que des phases ordonnées topologiquement, dont l'exploitation future requiert une compréhension plus profonde des interactions, impliquant des efforts conjoints dans de multiples directions.

Pour qu'ils soient de la plus grande qualité possible, la synthèse de ces matériaux nécessitera des interactions importantes avec les disciplines voisines que sont la chimie et l'ingénierie. La caractérisation expérimentale impliquera quant à elle l'amélioration des capteurs ainsi que des techniques de mesures en conditions extrêmes (pression, température).

Le contrôle des systèmes quantiques devra par ailleurs être renforcé par l'amélioration des protocoles d'hybridation et de contrôle de la matière par la lumière (refroidissement et piégeage d'atomes, d'ions ou de molécules), ou de la lumière elle-même, tout en travaillant à réduire la décohérence. Ces avancées devraient permettre en retour des progrès significatifs pour les mesures de précision et la simulation quantique. Enfin, la contribution de la physique numérique sur ordinateurs classiques restera essentielle pour l'interprétation des résultats expérimentaux obtenus sur les plateformes quantiques.

L'extension des capacités instrumentales pour produire et sonder la matière à de nouvelles longueurs d'onde figure parmi les enjeux primordiaux dans de nombreux domaines des milieux dilués ou condensés. De nouvelles sources optiques cohérentes devraient non seulement amener à des avancées fondamentales mais aussi permettre la mise au point de capteurs et dispositifs aux capacités inédites, contribuant notamment à dépasser les limites techniques rencontrées dans la cohérence de l'interaction laser-atome. Enfin, le développement de l'imagerie hyperspectrale,

depuis l'infrarouge jusqu'au THz, nécessitera des progrès dans le traitement des données produites sur de multiples échelles, parfois en temps réel, en qualité et en volume toujours accrus.



PHYSIQUE DU VIVANT

Résumé

La physique du vivant couvre des domaines extrêmement variés que l'on peut regrouper en trois thématiques principales: l'instrumentation pour le vivant, les systèmes modèles pour l'expérimentation, et les concepts et modèles théoriques. Les perspectives qui découlent de ce domaine de recherche se trouvent d'une part dans les enjeux sociétaux, notamment en lien avec la santé, d'autre part dans la compréhension fondamentale de systèmes complexes que sont les systèmes vivants. La multiplicité des échelles d'espace et de temps mises en jeu dans le vivant, l'organisation et la dynamique spécifiques à ces échelles, ainsi que leur couplage, présentent des défis pour la physique de la matière complexe à l'équilibre et hors d'équilibre. Par ailleurs, ces approches physiques permettent souvent de conceptualiser et de modéliser des phénomènes génériques observés dans des systèmes vivants très différents et ainsi faire un pont de compréhension entre des disciplines qui se trouvent scindées en domaines différents de la biologie. Appréhender l'organisation de la matière vivante nécessite une quantification et une compréhension de ce qu'est la matière active et d'en prendre en compte les contraintes, comme la paroi rigide de certains types de bactéries, ou la matrice extracellulaire des tissus. La matière vivante peut aussi être génératrice de contraintes, par exemple en créant une tension au pourtour d'un amas cellulaire due à la contraction ou à l'extension de chaque cellule, et ainsi se déformer et croître par des effets collectifs qui font l'objet de modélisation physique à toutes les échelles. Enfin, l'auto-organisation ou l'auto-assemblage des systèmes vivants, comme le remodelage du cytosquelette au cours de la division cellulaire ou la cicatrisation des tissus, sont régis par des lois couplant les propriétés électro-magnétiques, la signalisation ou la biomécanique et intégrant des boucles de rétroaction suivant les stimuli externes. Comprendre cette complexité est un défi pour la physique.

Les systèmes vivants sont une source d'inspiration pour explorer de nouvelles questions de physique hors d'équilibre. L'utilisation de systèmes modèles (biochimie de synthèse, mais aussi bactéries, microalgues, voire animaux) offre une variation des paramètres expérimentaux permettant d'affiner les modèles ou de tester des prédictions théoriques (rhéologie, transitions de phase, etc.).

Quantifier la conversion et l'utilisation de l'énergie chimique (par exemple la consommation d'adénosine-triphosphate) dans la matière active passe par la connaissance et la compréhension des mécanismes de transduction de l'énergie, du rôle des flux d'énergie et de leurs fluctuations spatio-temporelles, ainsi que des mécanismes moléculaires de régulation associés.

Le traitement de l'information dans le vivant mène à une prise de décision (par exemple lors de l'initiation du développement d'un membre ou d'un organe) qui peut être abordée par des approches physiques aussi diverses que l'hydrodynamique, le traitement de l'information génétique, ou la biomécanique.

La modélisation physique nourrie et inspirée de modèles expérimentaux épurés, quantifiables et reproductibles permettra de faire varier les paramètres du système et d'inspirer et nourrir les

hypothèses des lois physiques du vivant. Une approche globale prenant en compte tous ces aspects, ainsi que les variables des systèmes vivants ou inspirés du vivant, pourra alors émerger. Le développement de nouveaux instruments d'imagerie, optique, par rayons X, électronique, ou acoustique, permettra d'accéder aux informations aux petites échelles de temps et d'espace et de nourrir les approches physiques intégrant toutes ces échelles auxquelles s'opèrent des changements dans la matière vivante.

Thématiques à fort impact potentiel

dont le développement devra faire l'objet d'une attention particulière dans les années à venir.

La physique du vivant vise d'une part à décrire les principes physiques à l'œuvre dans les systèmes vivants mais aussi à fournir des outils de mesure pour sonder la matière vivante. Dans chaque domaine, théorie et expérience sont mêlées et construites ensemble, en faisant varier les paramètres des systèmes, pour aboutir à la mise en équation du phénomène étudié. La matière vivante est dynamique et se réorganise constamment en consommant l'énergie chimique. Elle peut ainsi modifier ses propriétés mécaniques, ses auto-assemblages, son organisation, les échanges moléculaires, les interactions avec l'extérieur. Dans ce domaine, et d'après les conclusions de la prospective, CNRS Physique a identifié deux enjeux principaux qu'il est important de considérer pour favoriser le développement futur de la physique du vivant.

L'un des défis à relever est de parvenir à sonder la matière avec de toujours plus hautes résolutions spatiale et temporelle tout en modifiant le moins possible les molécules élaborées naturellement par le vivant. Les caractéristiques physiques de la matière vivante à différentes échelles pourront ainsi être quantifiées par des méthodes instrumentales avancées s'appuyant en particulier sur la microscopie en champ proche, les mesures mécaniques ou électrophysiologiques, l'utilisation de différents types d'ondes, optiques, électromagnétiques mécaniques et acoustiques.

Un autre défi concerne la reproduction des fonctions du vivant dans des conditions physiologiques (auto-assemblages à toutes les échelles, organoïdes). Étudier l'émergence et la persistance de structures ou mouvements collectifs de particules auto-propulsées et pouvant partager de l'information (matière active informée), mais aussi le couplage physique entre le génome et le reste de la cellule (physique des chromosomes), permettra de comprendre les processus physiques qui gouvernent la transmission de l'information dans les systèmes biologiques. Le biomimétisme contrôlé devrait permettre d'aider à proposer des modélisations physiques pertinentes régissant le vivant et de tester comment il est possible de contrôler ses fonctions, l'organisation de ses composants, et comment elles sont affectées par une modification de l'environnement.

LOIS FONDAMENTALES

Résumé

L'étude des lois et des interactions fondamentales couvre un très vaste spectre: du rayon de Hubble, $r_H = 10^{26}$ m, à l'échelle de Planck, $l_p = 10^{-35}$ m. Cela couvre la physique des particules élémentaires et des astroparticules, la cosmologie et la gravité en passant par la physique de basse énergie comme la physique atomique et de la matière condensée.

La physique des lois fondamentales est étudiée par un large éventail de méthodes, tant expérimentales que théoriques ou numériques. Historiquement, d'autres instituts du CNRS ont coordonné la physique expérimentale des particules aux très hautes énergies et l'observation de l'Univers, tandis que CNRS Physique a soutenu les études théoriques et numériques ainsi que les mesures de précision aux basses énergies. Bien que ces activités soient réparties sur plusieurs instituts, elles sont complémentaires et contribuent au même objectif commun: élucider les lois fondamentales de l'Univers.

Au-delà de l'interprétation d'observations à travers des principes fondateurs, la théorie peut mener à un nouveau paradigme dont la vérification expérimentale, au moment de son énoncé, n'est pas encore possible. La théorie développe des outils de calcul et d'analyse inédits pour fournir des prédictions de plus en plus précises d'observables expérimentales, en cours ou à venir, afin de valider un modèle, délimiter et déceler un signe avant-coureur de nouvelle physique. Après un siècle d'attente, la détection des ondes gravitationnelles (OG) ouvre des perspectives extraordinaires pour sonder l'Univers. Les futures analyses de données de haute précision en ondes gravitationnelles et cosmologie auront besoin d'outils mathématiques nouveaux, comme les développements récents empruntant de nouvelles techniques (amplitudes) et des approches (*bootstrap*) héritées des calculs de précision en physique des hautes énergies. Ainsi, la découverte récente du boson de Higgs aura requis des calculs extrêmement complexes et des simulations phénoménologiques poussées. Cet effort sera poursuivi, d'autant que les calculs théoriques ont mis en avant des structures mathématiques ouvrant un domaine en pleine expansion. On trouve une effervescence similaire dans l'extraction et l'interprétation des paramètres cosmologiques dans le cadre du modèle Λ CDM. La physique des neutrinos est dans une phase foisonnante à la fois en physique des hautes énergies, en cosmologie, en astrophysique et à travers les OG. Des neutrinos de type Majorana pourraient expliquer l'asymétrie matière-antimatière. Le problème d'une formulation quantique fondamentale de la gravité reste un défi qui questionne les principes fondateurs de la mécanique quantique, la nature de l'espace-temps et l'origine de l'énergie noire et de la matière noire. Par exemple, l'étude des corrélations dans les fluctuations de densité primordiales, qui conservent une trace de leur genèse où à la fois la mécanique quantique et la gravité jouent un rôle fondamental, est très attendue. Une activité intense repose sur la découverte de dualités entre certaines théories de jauge et des formulations de la gravitation dans des espaces courbes. Les propriétés des dualités, l'étude des systèmes intégrables et la découverte de symétries sous-jacentes (insoupçonnées jusqu'à peu) promettent des développements considérables. La dualité holographique, reliant la gravitation quantique dans un espace anti-de Sitter

à une théorie des champs conformes définie sur le bord de cet espace, se manifeste en matière condensée par des métaux dits étranges (ou planckiens) qui pourraient présenter une intrication quantique et avoir un lien avec la physique des trous noirs. De même, en astrophysique des particules, l'approche synergique multi-messagers se développe considérablement. Elle vise à combiner les manifestations multiples d'un même événement à travers plusieurs observables: signaux électromagnétiques sur un large spectre incluant ceux des supernovæ et kilonovæ, période des pulsars, télescopes à neutrinos, rayons cosmiques chargés notamment d'antimatière, OG, fond diffus cosmologique, cartographie des grandes structures et autres sondes cosmologiques.

Aux basses énergies, les avancées réalisées dans le contrôle précis de la lumière et de la matière ont conduit à la montée en puissance et à la diversification des mesures de précision. La convergence de nombreuses technologies et méthodologies promet de réels progrès dans divers domaines (métrologie des fréquences, interférométrie atomique, opto-mécanique...). Celles-ci couvrent le contrôle à l'échelle quantique de systèmes de complexité croissante, l'extension de la métrologie temps-fréquence ainsi que des dispositifs photoniques à des fenêtres spectrales jusque-là inaccessibles avec des puretés spectrales inégalées et des gammes de puissance étendues du photon unique au pétawatt. De nouveaux objets d'étude qui présentent une sensibilité accrue sont proposés pour sonder la variation des constantes fondamentales, tester les symétries fondamentales et l'électrodynamique quantique aux ordres supérieurs ou rechercher des signatures de matière noire ultralégère. Les expériences dédiées aux mesures de précision ont un potentiel de progression et de renouvellement indiscutable, via l'amélioration des dispositifs expérimentaux existants, mais aussi par l'exploitation de phénomènes quantiques poussés tels que l'intrication et la génération d'états comprimés de spins ou de la lumière, le contrôle quantique optimal ou les mesures combinant plusieurs sous-systèmes couplés (certains servant à sonder l'environnement ou à protéger de la décohérence). En outre, l'hybridation entre différents capteurs permettra un gain substantiel en sensibilité et un accès à de nouvelles grandeurs d'intérêt. De même, la mise en réseau des horloges et capteurs quantiques à grande échelle promet des avancées significatives qui devraient surpasser la portée des capteurs individuels. Dans ce contexte, l'infrastructure de recherche REFIMEVE unique au monde est un atout pour la France. L'espace et les laboratoires souterrains sont des environnements privilégiés, les expériences de physique quantique dans l'espace suscitant une attention croissante en raison des nombreuses possibilités qu'elles offrent pour tester les lois fondamentales de l'Univers, que ce soit avec des atomes froids, des dispositifs photoniques ou opto-mécaniques.

Thématiques à fort impact potentiel

dont le développement devra faire l'objet d'une attention particulière dans les années à venir.

Les mesures à basse énergie sont essentielles pour déterminer avec exactitude les constantes fondamentales de la physique et ainsi tester le Modèle Standard. Ces mesures bénéficient des progrès réalisés dans le contrôle de la lumière et de la matière et continuent d'augmenter leur précision. La capacité de contrôler des systèmes de plus en plus complexes à l'échelle quantique encourage à renforcer l'étude des systèmes moléculaires, qui peuvent avoir une sensibilité accrue à la physique au-delà du Modèle Standard. La mise en réseau d'interféromètres atomiques

sur une échelle allant de la centaine de mètres au kilomètre ouvre des perspectives pour tester des modèles de matière noire ultralégère ou pour détecter les ondes gravitationnelles dans une gamme spectrale inaccessible par les détecteurs optiques.

Pour leur conception et leur analyse, les mesures et observations expérimentales, qu'elles soient faites à basse ou haute énergie, doivent être accompagnées de recherches théoriques, dont elles bénéficient naturellement. L'utilisation de nouvelles méthodes analytiques et numériques pour les calculs de précision, en particulier en cosmologie et sur les ondes gravitationnelles, doit être encouragée. Les exemples, souvent issus de l'interface entre la physique des hautes énergies et les mathématiques, incluent de nouvelles techniques telles que celles basées sur les amplitudes, et des approches telles que *bootstrap* et holographie. Le développement de méthodes théoriques permettant l'exploration de modèles cosmologiques en vue de l'analyse des observations futures d'ondes gravitationnelles devra être particulièrement soutenu.

Enfin, un travail à l'interface entre théorie et observations, ainsi qu'une très forte synergie entre domaines, seront nécessaires.

NOUVEAUX ENJEUX POUR LES MÉTHODES NUMÉRIQUES

Résumé

La physique numérique a évolué pour devenir un pilier majeur de la recherche en physique établissant un lien essentiel entre la physique théorique analytique et l'expérimentation. Son champ d'action englobe de multiples domaines scientifiques, par exemple la physique des plasmas, l'étude des régimes extrêmes, la résolution de modèles quantiques pour les problèmes à N -corps... Dans tous ces champs d'études, les simulations numériques permettent de préparer et d'interpréter les expériences, et de valider et explorer les modèles théoriques. Les activités en physique des particules et en physique de la gravitation nécessitent également des simulations numériques pour compléter et comprendre les observations. Une tendance émergente est l'intégration de différentes échelles de modélisation que permet la physique numérique, ouvrant de nouvelles perspectives pour aborder des phénomènes complexes dans divers domaines, de la matière condensée à l'astrophysique. Les approches numériques *ab initio* sont également cruciales pour étudier les matériaux réels, complétant les modèles utilisant des paramètres ajustés à partir des données expérimentales. L'amélioration de la précision et de la fiabilité des calculs est nécessaire pour répondre aux défis futurs, tels que la modélisation *operando* (jumeau numérique) et la conception de nouveaux matériaux. Un nouveau champ pour les outils numériques en physique s'ouvre également dans le traitement et l'exploitation des données, que ce soit pour faire face aux masses de données produites par les outils expérimentaux ou d'observation, ou via l'utilisation à grande échelle de bases de données collectées par la communauté, par exemple sur les matériaux.

Le rôle des simulations numériques est donc de plus en plus important, et a été récemment accentué par l'émergence du calcul quantique et de l'intelligence artificielle/apprentissage automatique (IA/ML) devenus des outils standard pour le traitement des données, la génération de codes et l'optimisation des simulations. Au-delà des effets de mode, les avancées permises par l'IA/ML justifient d'explorer leurs potentialités et de familiariser les chercheurs avec celles-ci pour en tirer pleinement parti. Il est également important de reconnaître que le ML est avant tout un outil et de sensibiliser aux limites, aux dangers et aux défis associés, tels que la fiabilité des résultats, la durabilité des outils, la pré-évaluation des investissements nécessaires, sans ignorer la concurrence avec le secteur privé. Une autre frontière du domaine correspond au calcul quantique ; tout en reconnaissant la dimension exploratoire et fascinante de la recherche dans ce domaine, il est important de rester réaliste sur le temps de déploiement nécessaire et le champ des utilisations pertinentes.

Certaines problématiques communes à toute la physique doivent être prises en compte pour la physique numérique: en particulier, l'impact environnemental des gros calculateurs demande qu'il en soit fait une utilisation responsable. La diversification des profils et la promotion de la participation féminine dans la physique numérique sont également des enjeux importants

à considérer pour assurer une recherche inclusive et innovante dans ce domaine. De plus, la formation en matière de numérique nécessite souvent d'être reprise et remise à jour après les études supérieures.

Cependant, ce champ fait preuve d'une dynamique remarquable, et d'ici à 2030, nous verrons l'exploration de territoires encore mal arpentés par ces méthodes, tels que les phénomènes quantiques émergents, les matériaux en conditions extrêmes, les systèmes biologiques, la modélisation multi-échelle des systèmes complexes, la fusion inertielle, les caractéristiques de l'Univers primordial, et maintes autres directions dont nous ignorons à ce jour peut-être même l'existence.

Thématiques à fort impact potentiel

dont le développement devra faire l'objet d'une attention particulière dans les années à venir.

Les méthodes numériques sont présentes dans toutes les branches de la physique, et CNRS Physique considère que leur bon développement est un enjeu important des prochaines années. Certaines thématiques nouvellement apparues paraissent plus particulièrement susceptibles d'être accompagnées pour assurer leur bon épanouissement en France.

Un premier thème très récent concerne les méthodes d'intelligence artificielle. Ces nouvelles techniques numériques promettent des progrès décisifs dans des domaines aussi variés que les systèmes quantiques à N -corps, la mécanique statistique hors d'équilibre, les matériaux, la physique des verres, les études multi-échelles ou la physique des particules. Par exemple, la modélisation multi-échelle échoue souvent à combiner efficacement des données provenant de différentes sources et de différents niveaux de résolution ; l'utilisation de l'apprentissage automatique pour ce problème pourrait permettre de lever ces verrous et de développer des méthodes de couplage efficaces entre les échelles. Le développement de nouvelles techniques de simulation ou de traitement de données en utilisant ces outils, la compréhension fine des limitations de ces algorithmes et l'utilisation de méthodes issues de la physique pour améliorer ou mieux comprendre leur fonctionnement seront des enjeux importants des prochaines années, comme le sera la mise à disposition large dans nos communautés par des experts d'outils performants issus de ce domaine.

En parallèle, le traitement des données devient un domaine en soi, nécessitant des compétences particulières qui pourront s'appliquer dans de nombreux champs de la physique, en particulier expérimentaux. Le volume de données produites ou disponibles augmente en effet de manière très importante, justifiant l'utilisation ou la création de méthodes numériques raffinées et adaptées, par exemple la création de nouveaux algorithmes (classiques, quantiques ou hybrides) permettant de s'appuyer sur la structure des données pour compresser et exploiter l'information physique. Ce domaine est en plein essor et mérite d'être suivi pour s'assurer que des outils adéquats seront disponibles pour la communauté.

Enfin, des plateformes imparfaites de calcul quantique commencent à être disponibles, et il est important pour développer ces systèmes de manière optimale de disposer d'outils numériques créés par des spécialistes permettant de les simuler pour prédire leur comportement et améliorer leurs performances. En parallèle, les expériences qui constituent des simulateurs quantiques de modèles théoriques promettent à terme de fournir de nouveaux outils pour simuler les modèles

utilisés en physique quantique, et il est important qu'une interface continue de se développer entre les concepteurs de ces plateformes et les spécialistes de simulation numérique de ces modèles.

De manière plus générale, CNRS Physique veillera au bon développement de la physique numérique et à la carrière des personnels qui s'y consacrent, et sera vigilant aux besoins en postes d'ingénieurs dédiés. Un point d'attention important sera également de promouvoir les liens avec les communautés pertinentes en informatique et mathématiques.



VOLET 2

GRANDS DÉFIS SOCIÉTAUX

PHYSIQUE POUR LA SANTÉ

Résumé

Les applications médicales découlant de recherches fondamentales en physique sont déjà nombreuses et diversifiées. Pour n'en citer qu'un nombre restreint, l'imagerie médicale moderne et les techniques de thérapie non invasives reposent sur les découvertes passées en physique des rayonnements et en physique des ondes. Ainsi, les recherches fondamentales d'aujourd'hui vont logiquement mener au développement des applications médicales de demain, et les découvertes actuelles les plus fondamentales en physique de la matière, en capteurs de nouvelle génération, en métamatériaux ou encore en mise en forme de fronts d'ondes vont très probablement conduire à des dispositifs médicaux et de nouvelles pratiques médicales allant bien au-delà de ce que l'on peut aujourd'hui imaginer.

Au risque de passer à côté d'une révolution à venir, il est toutefois possible de mettre en avant certains domaines de recherches en physique particulièrement prometteurs, par exemple le développement de capteurs ultra-sensibles ou de nouveaux dispositifs d'imagerie et de thérapie (qu'il s'agisse de délivrance d'agents thérapeutiques ciblés physiquement ou d'action physique directe par interactions onde-matière pour détruire à distance des tissus pathologiques ou pour stimuler les systèmes nerveux centraux ou périphériques). Les domaines de la physique sont aussi variés que les applications potentielles, mais deux axes transverses majeurs peuvent d'ores et déjà être mis en évidence: le développement de systèmes portables et ultraportables et la limitation de l'impact environnemental des pratiques de soins. Le développement de systèmes portables permettra non seulement un déploiement plus aisé, en particulier dans les déserts médicaux, mais également une prise en charge plus rapide et plus efficace en les intégrant dans les véhicules d'intervention. L'impact environnemental des pratiques de soins ne peut plus être ignoré, que ce soit au niveau de la quantité de matériel médical à usage unique ou de la fabrication et du conditionnement des médicaments. La physique des matériaux, la modélisation, entre autres, ont un rôle majeur à jouer dans la diminution et le traitement des déchets, et dans la limitation de l'impact environnemental des médicaments.

Il est indéniable que l'intelligence artificielle jouera un rôle essentiel dans la santé de demain, depuis la prévention jusqu'au diagnostic et au traitement. Le gouvernement français et les organismes de recherche l'ont bien cerné et ont déjà intégré l'IA dans des programmes de recherche ambitieux. Il est donc possible de prendre le parti d'acter cette tendance déjà bien établie à laquelle vont participer les physiciennes et physiciens de toutes disciplines et se concentrer sur les autres innovations qui seront susceptibles d'émerger en santé et qui pourront soit se développer indépendamment de l'intelligence artificielle, soit en bénéficier, soit encore la nourrir par l'apport de nouvelles sources de données de santé.

Thématiques à fort impact potentiel

dont le développement devra faire l'objet d'une attention particulière dans les années à venir.

Dans le domaine de la physique pour la santé, les conclusions de la prospective ont amené CNRS Physique à identifier trois axes de développements prioritaires.

Diverses données, comme la composition du microbiote, les profils génétiques et les répertoires immunitaires permettent à la fois la caractérisation et la surveillance de la santé humaine. Ces données, qui évoluent dans le temps, fournissent des indications sur les influences héréditaires ou environnementales auxquelles le sujet a été exposé. Le suivi de la santé humaine s'apparente ainsi à l'étude d'un système complexe comprenant un grand nombre de variables qui sont en outre souvent corrélées. La physique statistique hors équilibre est particulièrement adaptée à l'étude dynamique des phénomènes dans le domaine de la santé et permet d'appréhender comment certains mécanismes deviennent prépondérants quand les conditions externes ou les variables sont modifiées. De fait, en exploitant cette approche physique, les données en santé peuvent être traitées et comprises par une modélisation cohérente, reproductible et prédictive, tout en optimisant le volume de données requis pour un diagnostic précis et une thérapie ciblée.

Un potentiel de rupture significatif en neurosciences réside dans l'exploration, par des méthodes de microscopie et d'imagerie, de l'interaction des signaux électriques et magnétiques avec les tissus cérébraux, au-delà des synapses et des neurotransmetteurs. Par ailleurs, le développement d'outils de diagnostic, en microscopie et imagerie notamment, permet de sonder en temps réel la mécanique aux petites échelles et d'accéder aux évolutions des pressions et rigidités locales des tissus en lien avec les réactions génétiques et biochimiques, fournissant des informations cruciales sur le lien entre la mécanique, la signalisation et la machinerie interne des cellules. Rendus portables au chevet du patient, l'ensemble de ces outils de mesure, soutenus par des méthodes d'intelligence artificielle, contribueront à renforcer le diagnostic *in situ* et son couplage avec une thérapie personnalisée et adaptative, notamment pour la stimulation cérébrale profonde non invasive.

Enfin, la compréhension des mécanismes de la morphogenèse, en particulier dans le contexte de la croissance tumorale, bénéficiera du développement des organoïdes dont l'usage en médecine régénérative est particulièrement prometteur.

PHYSIQUE POUR L'ÉNERGIE ET LE CLIMAT

Résumé

Face aux crises climatique et énergétique, la France s'est engagée dans une transition vers un mix énergétique décarboné en 2050, avec un cap crucial à franchir en 2030. Cette transition énergétique va nécessiter des sauts conceptuels ou technologiques et une prédiction du contexte climatique impactant la consommation énergétique. De nombreuses physiciennes et physiciens seront ainsi impliqués dans des travaux liés à l'amélioration des dispositifs de conversion d'énergie, dans les scénarios de transition ou dans la physique du climat à l'horizon 2035.

En fission nucléaire, de nouveaux concepts de réacteurs (*Small Modular Reactors*, réacteurs de 4^e génération) nécessitent l'acquisition de nouvelles données de base (modélisation neutronique et thermo-hydraulique, couplages multi-physiques). Le déploiement de la fusion nucléaire nécessitera des avancées expérimentales, théoriques, numériques (instabilités, turbulence et transfert radiatif à des échelles multiples) et technologiques (champs magnétiques intenses, lasers haute cadence, matériaux). L'augmentation de l'efficacité des convertisseurs photovoltaïques suppose l'émergence de nouveaux matériaux et de nouvelles architectures s'appuyant sur la maîtrise des processus de relaxation et des phénomènes physiques aux interfaces, sur les caractérisations multi-physiques, multi-échelles et en conditions *operando*, et sur la prédiction du comportement à long terme des dispositifs. Des besoins similaires existent pour la conversion d'énergie éolienne et hydraulique. La physique des porteurs d'énergie (électrons, photons, phonons), de leur couplage et de leurs interactions à l'échelle microscopique est cruciale pour la conversion entre les différentes sources d'énergie, que ce soit pour le moissonnage de l'énergie à très petite échelle ou pour le développement de nouveaux concepts d'utilisation rationnelle de l'énergie. L'intermittence des énergies renouvelables nécessaires à la transition énergétique impose le recours massif à des moyens de stockage aux échelles globale et locale, où l'efficacité des cycles stockage/déstockage devra être optimisée. Des progrès théoriques dans le domaine des matériaux sont nécessaires pour le stockage d'hydrogène à grande échelle (fatigue, cyclage). Dans les batteries, une majorité des phénomènes importants (corrosion, formation d'interphases ou de dendrites) ont lieu au niveau des interfaces, nécessitant de développer des méthodes *operando* pour sonder des échelles de temps et d'espace de plus en plus étendues, afin d'améliorer les performances et les durées de vie. La physique peut permettre de limiter l'impact du changement climatique en contribuant à améliorer l'efficacité énergétique des procédés et des matériaux, et à mieux prendre en compte des contraintes de seconde vie et de recyclage dès l'élaboration des matériaux (pour la construction ou l'énergie) et des systèmes. L'optimisation de la valorisation du CO₂ grâce aux plasmas froids est une autre piste à explorer. Pour réussir la transition énergétique, un enjeu important est de comprendre globalement, à l'aide d'outils physiques, l'interaction complexe entre demande sociale, déploiement des réseaux électriques et urbains, et demande en minéraux disponibles pour les équipements utilisés.

Thématiques à fort impact potentiel

dont le développement devra faire l'objet d'une attention particulière dans les années à venir.

Parmi les multiples enjeux de la physique pour l'énergie et le climat identifiés dans le document de prospective, CNRS Physique sera tout particulièrement attentif à accompagner et développer les directions suivantes.

Une première direction concerne l'apport de la physique à la transition énergétique. Elle inclut par exemple les avancées sur la fusion nucléaire, aussi bien fondamentales (transfert radiatif, instabilités et turbulence dans le plasma) que technologiques (champs magnétiques intenses, lasers haute cadence, matériaux). On peut aussi retenir le moissonnage de l'énergie aux très petites échelles (nanométriques), fondé sur les progrès de la physique des porteurs d'énergie (électrons, photons, phonons) et de leurs interactions, ou encore la récupération et la valorisation de la chaleur fatale.

Une deuxième direction est l'amélioration des matériaux pour la transition énergétique, grâce à une meilleure compréhension physique. Les enjeux concernent le développement des nouvelles énergies (photovoltaïque, par exemple), leur conversion (énergie éolienne ou hydraulique) et leur stockage (batteries, notamment) mais aussi l'isolation thermique et les matériaux de construction, par exemple. Cette amélioration devra aussi intégrer le cycle de vie des matériaux, leur impact environnemental et la durabilité de leur production.

Une troisième direction est l'apport de la physique à la transition écologique. Elle inclut d'une part la modélisation de phénomènes climatiques extrêmes et des dynamiques impliquées (écoulements océaniques, flux atmosphériques, nuages, etc.), l'analyse des incertitudes et de la sensibilité des modèles climatiques et leur couplage avec les choix énergétiques (quelles nouvelles énergies envisager dans des contextes où les tempêtes sont récurrentes, par exemple), et d'autre part le développement d'instrumentations innovantes (capteurs, mesures multimodales, métrologie) pour quantifier les différents scénarios possibles et accompagner leur déploiement.

PHYSIQUE POUR L'ENVIRONNEMENT, L'URBAIN ET L'ALIMENTATION

Résumé

Les enjeux de la physique pour 2030 dans les domaines de l'alimentation, de l'urbain et de l'environnement sont étroitement liés aux transitions sociétales et environnementales auxquelles nous faisons face. Ces transitions sont marquées par le changement climatique, qui impose une exigence accrue de sobriété en raison de la limitation des ressources, de la prise de conscience de son impact environnemental, mais également une nécessité de résilience et d'adaptation face aux perturbations écologiques et évolutions démographiques. Avec une population mondiale qui est à la fois vieillissante et en croissance rapide, la pression sur la production agricole et alimentaire s'est intensifiée, augmentant depuis soixante-dix ans. Cependant, l'impact écologique de ces pratiques menace désormais la sécurité alimentaire et nutritionnelle globale, mettant en lumière l'insoutenabilité des systèmes alimentaires actuels.

L'urbanisation toujours plus croissante génère une demande croissante pour la construction et la rénovation urbaine, intégrant la recherche de neutralité carbone, la minimisation des impacts environnementaux et une sobriété des ressources. En parallèle, les organismes vivants et les écosystèmes sont exposés à une multitude de stress et de risques, tels que la pollution par des particules fines, les perturbateurs endocriniens, et divers agents chimiques, nécessitant une gestion prudente de systèmes dynamiques complexes souvent déséquilibrés.

Dans ce contexte, la physique joue un rôle crucial en apportant des outils et méthodes pour mieux comprendre et modéliser ces phénomènes. Dans les milieux complexes, la physique aide à analyser et prédire les comportements des systèmes désordonnés, hétérogènes et multiphasiques. Elle fournit des modèles pour étudier les dynamiques de transport, les transferts thermiques et la diffusion des contaminants dans l'air, les sols et les eaux, essentiels pour la conception de villes durables et la protection des écosystèmes.

En ce qui concerne les échelles multiples, la physique est indispensable pour connecter les phénomènes microscopiques aux impacts macroscopiques. Cette approche est cruciale dans la recherche environnementale pour comprendre comment des changements à petite échelle affectent les grands systèmes écologiques, et dans l'urbanisme pour adapter les infrastructures aux contraintes climatiques en évolution.

L'instrumentation avancée, le développement de nouveaux capteurs et systèmes de mesure permettent un suivi environnemental plus précis et plus étendu, facilitant la collecte de données en

temps réel et leur analyse pour une gestion plus réactive et prédictive des ressources naturelles et des services urbains.

Enfin, la modélisation et la simulation fournissent un cadre pour intégrer des données diverses et complexes, permettant de tester des scénarios futurs et de planifier des interventions stratégiques sans perturber les systèmes existants. Ces outils sont essentiels pour concevoir des solutions qui répondent à la fois aux besoins de résilience environnementale et aux exigences de développement durable.

En résumé, la physique, en renforçant ses liens avec la société et en valorisant les applications pratiques de ses recherches, ne se contente pas seulement de répondre aux défis actuels: elle prépare également le terrain pour l'intégration de nouvelles générations de scientifiques motivés par la résolution de problèmes réels et urgents. Cette démarche augmente la pertinence et l'impact de la discipline dans la construction d'un avenir plus durable et résilient.

Thématiques à fort impact potentiel

dont le développement devra faire l'objet d'une attention particulière dans les années à venir.

Les défis futurs de la physique liés à l'alimentation, à l'urbanisme et à l'environnement sont intimement liés aux transitions vers lesquelles nous nous dirigeons. Dans ce contexte, CNRS Physique a identifié deux axes de développement prioritaires parmi les nombreuses perspectives de recherche mentionnées dans le document de prospective.

Un axe qui se dégage concerne l'étude de l'interaction entre les multiples enjeux environnementaux. Pour étudier la physique de ces phénomènes complexes, il est nécessaire de réaliser davantage de mesures et savoir les interpréter. Pour ce faire, durant les prochaines années, il faudra développer et exploiter de plus en plus de capteurs à bas coût, miniaturisés, dispersés en grand nombre et permettant des mesures en temps réel sur des temps longs. Ces outils devraient permettre le développement de modèles physiques théoriques et numériques originaux avec de larges domaines d'applications et une meilleure prise en compte de la complexité du réel. Les actions dans ce domaine favoriseront l'émergence de nouvelles problématiques interdisciplinaires de CNRS Physique avec CNRS Chimie, CNRS Écologie & Environnement, CNRS Sciences Humaines & Sociales et CNRS Terre & Univers.

Par ailleurs, notre civilisation produit énormément de déchets et la question du recyclage concerne de plus en plus de matériaux: déchets électroniques, radioactifs, plastiques, métaux, matériaux de construction (bitumes, bétons...), intrants chimiques. En lien avec les questions d'économie circulaire, il sera important de développer des recherches pour minimiser les pertes de propriétés physiques des matériaux au cours de leur cycle de vie. Il s'agit ici de maîtriser le lien structure-propriétés des matériaux pour permettre la réalisation de systèmes plus performants, plus résilients et plus durables.

PHYSIQUE POUR LES TECHNOLOGIES QUANTIQUES ET LES TECHNOLOGIES NUMÉRIQUES

Résumé

Le numérique est aujourd'hui omniprésent dans notre société. Son usage croissant s'accompagne d'importants défis (diminuer l'empreinte environnementale, s'approvisionner de certains matériaux stratégiques, composants et logiciels critiques), qui devront être relevés d'une part en adaptant les technologies existantes, et d'autre part grâce à de nouveaux paradigmes, comme par exemple ceux que promettent les technologies quantiques. Ces défis qui posent de très nombreuses questions de physique fondamentale solliciteront très largement les scientifiques.

Pour les technologies numériques et quantiques, trois domaines de recherche seront particulièrement actifs: i) les capteurs, l'imagerie et la métrologie ; ii) les communications et iii) la simulation et le calcul.

Le défi des technologies numériques pour les capteurs sera d'améliorer les sources cohérentes dans le moyen infrarouge, développer l'imagerie THz, intégrer les systèmes de détection avec d'autres composants dans des dispositifs pour former des solutions complètes, et garantir une opérabilité en environnement sévère. En parallèle, les technologies quantiques auront à démontrer qu'il existe un gain quantique sur un nombre croissant de cas d'usage, à développer de nouveaux supports pour la mesure, à mettre en réseau les capteurs et créer des architectures embarquées.

Dans le domaine des communications, les technologies numériques devront s'améliorer en montant en fréquence et en inventant de nouvelles architectures d'antennes intelligentes, reconfigurables, directionnelles. Il conviendra également d'accroître l'intégration photonique dans les dispositifs et de renforcer la convergence électronique-optique. L'avenir des technologies quantiques sera lié à l'amélioration de la technologie des composants élémentaires. Il faudra alors déployer des plateformes de test et des infrastructures opérationnelles. En parallèle les physiciennes et les physiciens travailleront à consolider le lien entre cryptographies quantique et post-quantique et à mettre en œuvre des protocoles pour faciliter la communication et l'interaction entre les différents éléments d'un réseau quantique.

Enfin, pour répondre aux enjeux de calculs et de simulations numériques, un accroissement de la performance des technologies numériques est attendu via la modification ou l'intégration de nouvelles architectures, comme le neuromorphique, et de nouveaux composants dans les systèmes pour améliorer leurs performances ou introduire de nouvelles fonctionnalités. Ces com-

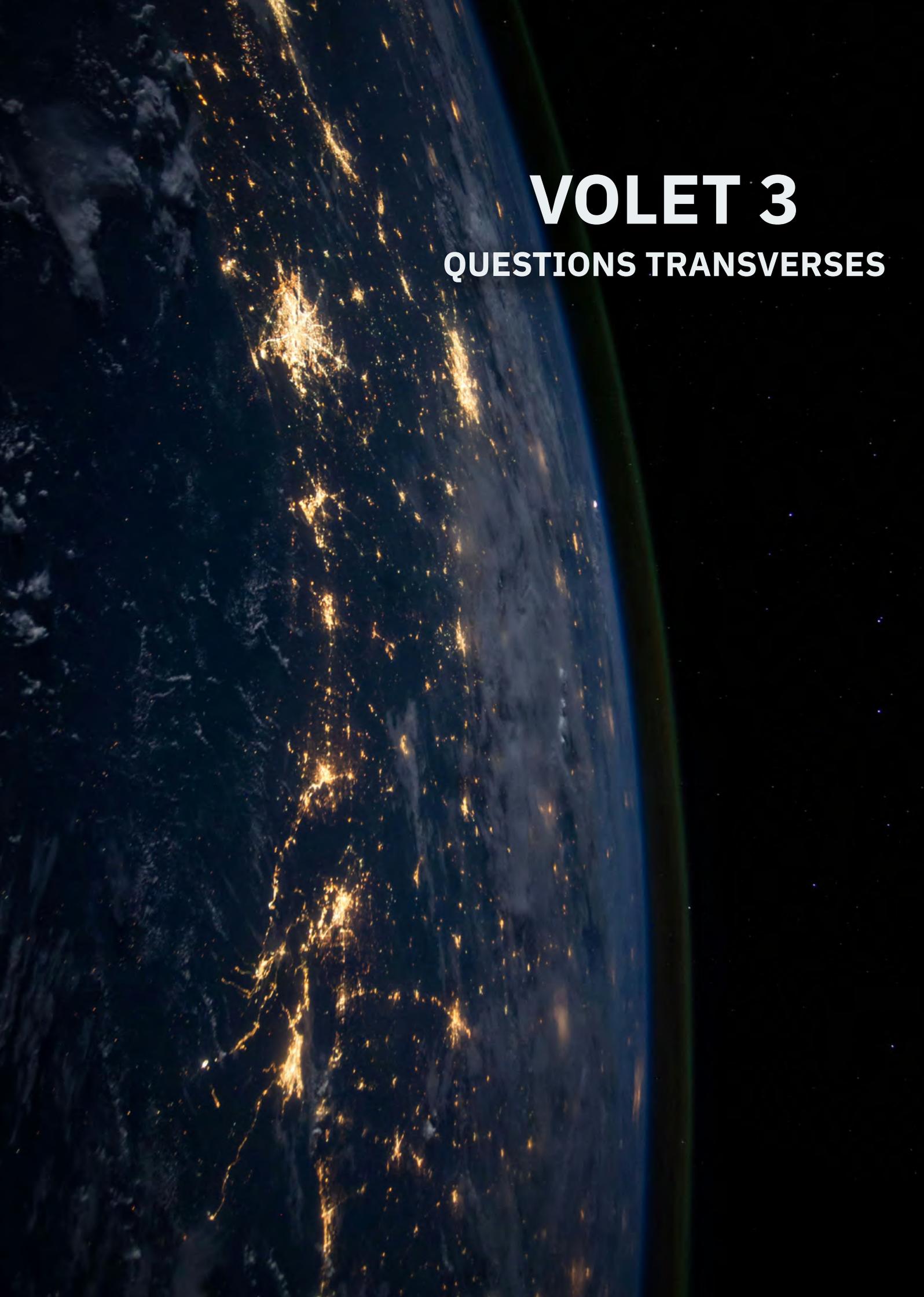
posants dont on cherche à exploiter les propriétés uniques peuvent être des dispositifs spintroniques pour le stockage et la manipulation de l'information, des composants supraconducteurs pour des applications telles que la transmission d'énergie avec une perte minimale, des dispositifs d'électronique moléculaire, etc. L'électronique se devra d'utiliser des composants plus durables. De l'autre côté, il conviendra de proposer des pistes scientifiques et technologiques afin d'identifier les ruptures qui pourraient permettre le passage à l'échelle. De l'autre côté, le calcul et la simulation quantiques devront proposer les tendances du passage à l'échelle et démontrer ainsi leurs valeurs ajoutées par rapport aux procédures classiques pour certaines catégories de problèmes. Cela passera par l'exploration de différents types de Qbits et nécessitera le développement de codes correcteurs.

Thématiques à fort impact potentiel

dont le développement devra faire l'objet d'une attention particulière dans les années à venir.

Les technologies quantiques sont à l'orée de potentielles ruptures scientifiques et technologiques majeures qui auront des impacts sur l'ensemble de la société, avec des retombées à la fois dans les domaines civils et militaires. Compte tenu des enjeux, en termes économiques et de souveraineté, ce domaine fait l'objet d'une compétition mondiale impliquant à la fois les états et les géants du numérique. L'élément qui rend ce développement atypique réside dans l'interaction sans précédent entre recherches fondamentale et appliquée, dynamiques entrepreneuriales et industrielles. En effet, cette course mondiale vers le traitement et la communication quantiques de l'information est lancée alors que le niveau technologique des briques de base n'est pas encore à pleine maturité car de nombreuses questions fondamentales restent encore ouvertes.

CNRS Physique est donc conscient que le défi réside actuellement dans une articulation cohérente des acteurs et des travaux, devant allier recherches fondamentale et technologique, sur l'ensemble de la chaîne de valeur des technologies matérielles et logicielles. Une telle articulation nécessite un couplage fort entre i) les concepts de rupture permettant d'assurer la continuité des actions vis-à-vis du passage à l'échelle (*noisy intermediate scale quantum* vers *large scale quantum*) pour le calcul et la simulation quantiques ; ii) le développement de systèmes compacts et embarquables pour la communication et les capteurs quantiques ; iii) le renforcement des technologies des composants critiques en lien avec les matériaux (micro et nano-structurés) pour l'électronique et la photonique, à destination de l'ensemble des piliers des technologies quantiques ; et enfin iv) le déploiement de ces technologies quantiques au travers d'infrastructures dédiées en lien avec les grands programmes nationaux et européens.



VOLET 3

QUESTIONS TRANSVERSES

CULTURE SCIENTIFIQUE

Résumé

CNRS Physique aura comme défi dans les années à venir de tisser encore plus de liens entre physique et société. Il s'agit là d'une mission centrale d'un organisme national de recherche. CNRS Physique souhaite promouvoir la culture non seulement comme un héritage partagé par toute la société, mais aussi comme des connaissances spécifiques que chaque personne peut posséder individuellement.

La place aujourd'hui de la science dans la culture des Françaises et des Français, du grand public comme des femmes et des hommes politiques, n'est pas à la hauteur des défis que le monde doit affronter. On peut par exemple déplorer la faible présence des informations scientifiques dans les media généralistes. Pourtant les Françaises et les Français conservent une bonne image de la science et combler ce déficit culturel répond à une demande des citoyennes et de citoyens. Mais les enjeux vont bien au-delà: le fonctionnement de notre société n'a jamais impliqué une dimension scientifique aussi importante. En particulier, les choix politiques et les enjeux sociétaux nécessitent, pour les appréhender, choisir ou voter, une connaissance scientifique des phénomènes et de leurs implications.

Pour y parvenir, CNRS Physique pourra dans l'avenir s'appuyer sur trois leviers d'action: l'éducation à destination du monde scolaire, la médiation à destination de la société et des décideurs et décideuses, et la recherche participative.

Enfin, la science ouverte induit une démocratisation de l'accès aux savoirs, utile à l'enseignement, à la formation, à l'économie, aux politiques publiques, et plus largement à la société dans son ensemble. Elle constitue un levier pour l'intégrité scientifique et favorise la confiance des citoyens dans la science.

PARITÉ ET DIVERSITÉ(S)

Résumé

Le nombre de femmes reste notoirement faible à CNRS Physique. En effet, malgré les différentes politiques publiques en faveur de la parité, les chercheuses ne représentent que 21% de l'effectif des personnels chercheurs de l'Institut. Cette réalité soulève des questions sur les obstacles systémiques persistants dans le monde de la recherche et en particulier en physique.

Ces obstacles incluent des stéréotypes de genre ancrés dès l'enfance qui limitent l'attractivité de la physique pour les jeunes femmes, ainsi que des difficultés spécifiques rencontrées par les femmes dans les laboratoires qui peuvent les amener à ne pas y poursuivre leur carrière. Pour celles qui choisissent de rester en physique, ces difficultés, jointes au fait que l'articulation entre vie familiale et professionnelle repose toujours de façon disproportionnée sur les femmes, peuvent dégrader les conditions de travail et ralentir les évolutions de carrière.

En parallèle, la question de l'inclusion des personnes en situation de handicap reste préoccupante. Dans le cadre de sa politique d'insertion en faveur des personnes en situation de handicap, le CNRS ouvre chaque année des possibilités de recrutement dédiées, et est maintenant proche de l'objectif légal d'emploi de 6% de personnes en situation de handicap. Cependant, l'accompagnement doit être l'objet d'attentions spécifiques notamment pour leur carrière. D'autres défis majeurs incluent l'accessibilité des laboratoires et autres espaces de travail à nos collègues, ainsi que l'adaptation nécessaire des postes de travail et la prise en compte des difficultés rencontrées lors des voyages professionnels. Ces barrières sont d'autant plus problématiques qu'elles peuvent entraver significativement la carrière des personnes concernées, limitant leurs possibilités de financement et de promotion.

Ces constats mettent en lumière les difficultés à créer un environnement véritablement inclusif et équitable au sein de l'Institut, malgré une prise de conscience et des efforts continuels pour améliorer la situation. Le chemin vers une parité réelle et une meilleure intégration des personnes en situation de handicap à CNRS Physique nécessite donc une attention soutenue et des mesures adaptatives continues.

INTÉGRER LES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX À LA RECHERCHE EN PHYSIQUE

Résumé

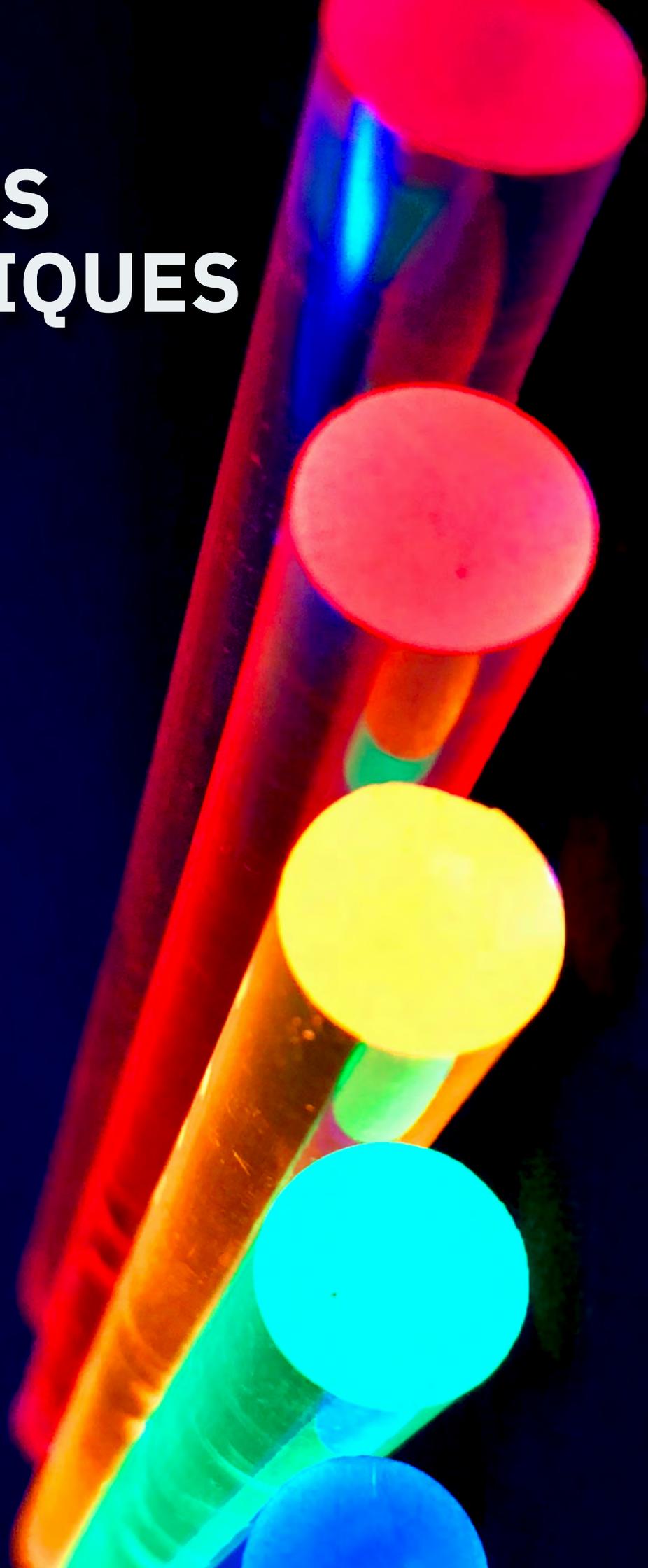
Interroger l'avenir de la physique au CNRS, c'est chercher à entrevoir les domaines en émergence, mais aussi penser les conditions futures d'exercice de cette recherche. Jusqu'à récemment, elles pouvaient se résumer au budget dont disposait l'établissement et ses partenaires et au contexte institutionnel définissant statuts des personnels, place des agences de financement, grands programmes, politique européenne de la recherche, etc. À ces conditions s'ajoutent désormais les contraintes bien plus tangibles et incontournables des crises climatiques, énergétiques et écologiques. Ces crises, prédites de longue date par les scientifiques, se matérialisent et se répercutent dans toutes les sphères de la société et ne devraient que s'accroître. La recherche en physique sera ainsi confrontée durant la prochaine décennie à l'obligation légale de réduire rapidement ses émissions de CO₂ (2 à 5 % par an) et devra faire face à des pénuries de ressources essentielles. Sans une action déterminée de la communauté scientifique, cette crise environnementale pourrait avoir des conséquences néfastes sur la liberté de la recherche, la cohésion interne des laboratoires et le soutien public à la recherche en physique. Répondre à ces enjeux entraînera des changements dans les pratiques de recherche aux échelles individuelle, du laboratoire, mais aussi institutionnelle.

Depuis plusieurs années, la communauté scientifique s'est engagée dans l'évaluation des impacts environnementaux de ses activités, notamment à travers l'initiative Labos 1point5. De nombreuses actions ont été entreprises pour réduire la consommation d'énergie, limiter les déplacements, réduire la production de déchets et améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments.

Cependant, d'autres évolutions de la pratique de la recherche seront indispensables dans les années à venir et des engagements sont nécessaires.

Ci-contre : Photographie de tubes de plexiglass recouverts de solution de nanocristaux de différentes couleurs sous illumination UV @ LHUILLIER et GREBOVAL ; INSP, CNRS

ACTIONS SPÉCIFIQUES



LA PROBLÉMATIQUE DES MATÉRIAUX À CNRS PHYSIQUE

Les matériaux jouent un rôle important dans de nombreux domaines de la physique, depuis la physique atomique, moléculaire et optique, la mécanique, la matière condensée, jusqu'aux sciences et technologies quantiques ou dans l'apport de la physique aux différents enjeux de la transition énergétique. Intimement liés à la question de leur synthèse, ils jettent des ponts avec la chimie, l'ingénierie, les sciences du vivant, l'astrophysique, les sciences de la Terre et de l'Univers. L'importance des recherches sur les matériaux et la maîtrise de leurs propriétés au plus haut niveau est ressortie explicitement du travail de prospective de plusieurs ateliers, en soulignant nos forces, mais aussi nos faiblesses dans le contexte international.

Les questions soulevées concernent :

- les enjeux d'élaboration et de fonctionnalisation (épitaxie/hybridation/micro-nano-fabrication/procédés métallurgiques). Nous avons identifié le risque d'une perte de savoir-faire en cristallinogenèse de matériaux massifs, et l'absolue nécessité du maintien des compétences en élaboration des matériaux complexes et multi-phasés quelle que soit leur dimensionnalité. Il s'agira d'identifier les besoins communautaires en termes d'équipements de croissance, de micro-nano-fabrication et de traitements de surfaces à la fois génériques ou spécifiquement adaptés au développement de matériaux et démonstrateurs dédiés aux enjeux applicatifs.

- les enjeux d'instrumentation, de caractérisation et de modélisation sont indissociables d'une recherche de pointe sur les matériaux. L'étude des matériaux en conditions extrêmes ou soumis à des stimuli extérieurs pour atteindre les propriétés hors-équilibre nécessitent des instruments ou des plateformes spécifiques souvent en conditions *in situ* voire *operando* et dont le développement s'étale sur plusieurs années, exigeant des financements sans à-coups. Il est également ressorti de la prospective des limites devenues critiques à l'utilisation d'approches empiriques pour l'ingénierie de matériaux soulignant la nécessité de moyens numériques pour la modélisation et les simulations. De même, le développement de modèles théoriques couplés à l'IA permettra de mieux comprendre et de prédire les relations structures-propriétés des matériaux (rôle de la composition, du désordre, de la dimensionnalité, des effets de proximité et d'interfaces).

Ce sont deux enjeux de souveraineté dans les domaines scientifiques et industriels.

Il paraît donc naturel que CNRS Physique soit l'un des Instituts à l'initiative d'un axe transverse prioritaire sur les matériaux dans le Contrat Objectifs Moyens Performances 2024 – 2028 du CNRS. En amont de la prospective, CNRS Physique a été à l'initiative de plusieurs Chaires de Professeur Junior (CPJ CNRS) adressant la problématique des matériaux (MATINNOV, CARMATAT, MATQUANT), et en lien avec la prospective, une autre CPJ CNRS a été ouverte en 2024 (MATEM) ainsi qu'un poste CRCN en section 03 sur un profil « Épitaxie de semi-conducteurs, matériaux topologiques, et hétérostructures associées ».

CNRS Physique inscrira le soutien à la synthèse et à la caractérisation des matériaux dans sa politique scientifique à long terme, et engagera également des actions à plus court terme comme la création de groupes de travail avec les autres acteurs concernés au CNRS par les enjeux des matériaux, pour établir un état des lieux et des propositions d'actions pour la cristallogénèse de matériaux massifs, et des matériaux en couches minces et hétérostructures pour l'électronique et la photonique. La réorganisation en cours des périmètres des sections du CoNRS devra bien prendre en compte les spécificités de la physique des matériaux.

ACTIONS SPÉCIFIQUES

Nous avons rappelé en avant-propos le contexte et les objectifs de ce cahier de stratégie et présenté les engagements généraux de CNRS Physique. Au-delà de ces directions stratégiques essentielles, d'autres actions de l'Institut s'appuient sur les conclusions de la prospective: actions spécifiques mises en place ces douze derniers mois, mais aussi des actions spécifiques, déjà initiées, et qui seront déployées en 2024 — 2025.

Cette liste d'actions ne constitue qu'une très petite partie des actions soutenues par l'Institut cette année. À travers les dotations des laboratoires, les frais d'infrastructures, les appels à projet, les actions à l'international, le programme prématuration ou le pilotage de laboratoires communs avec des entreprises ou des start-ups et bien sûr les recrutements des différentes catégories de personnel, l'Institut a un rôle essentiel de soutien de la recherche. Ces actions n'en demeurent pas moins cruciales pour préparer le futur à l'horizon 2030.

Actions spécifiques concernant un large nombre de thématiques

- En concertation avec les représentants du CEA et de France Universités, CNRS Physique a milité avec succès en 2024, pour faire évoluer le CE30, unique comité ANR dédié à la physique fondamentale, en deux axes différents complémentaires. Le premier regroupera la « Physique des concepts fondamentaux et physique de la matière diluée » et le second « Physique de la matière condensée. Cela devrait permettre une meilleure évaluation des dossiers de physique et une augmentation du nombre de projets financés dans notre discipline.
- En concertation avec d'autres Instituts, CNRS Physique a obtenu l'inscription, parmi les 6 défis transverses du Contrat d'Objectifs de Moyens et de Performance (COMP) 2024 — 2028 du CNRS, des deux thématiques:
 - Matériaux du futur
 - Instrumentation sans limite
- Soutien à l'écosystème en nanofabrication et notamment à travers le réseau des centrales de proximité RENATECH+.

Électronique et photonique avancées

Matière, lumière et processus quantiques

Physique pour les technologies quantiques et les technologies numériques

2023 — 2024

- Affichage d'un poste colorié en section 3 sur le thème « Épitaxie de semi-conducteurs, matériaux topologiques, et hétérostructures associées ».
- Création d'une Chaire de Professeur Junior (CPJ CNRS) TheMaCoIF couplant Matière condensée et Information quantique.

- Création, en partenariat avec Inria, l'ENS Paris-PSL et les Mines Paris-PSL, de l'équipe Quantic au laboratoire LPENS dédiée à l'ingénierie quantique.
- Accompagnement, en partenariat avec Inria et l'École Polytechnique-IPP, de la création de l'équipe PhiQus au laboratoire CPHT dédiée au calcul quantique.
- Création de l'IRN CAFQA, pour Canada-France Quantum Alliance, réunissant 8 universités françaises et 8 universités canadiennes sur le thème des sciences et technologies quantiques.
- Lancement avec la DRF du CEA de l'Avant-Projet Détaillé (APD) d'ICONE, la potentielle source pulsée de neutrons sur le sol français

2024 — 2025

- Promouvoir des réunions inter-GDR et impulser la création d'équipes-projets pluridisciplinaires
 - pour explorer la convergence de nouveaux concepts aux interfaces de différents domaines: photonique, neuromorphique, spintronique...
 - pour explorer de nouvelles approches hybrides pour l'ingénierie quantique, les capteurs quantiques, la conception de nouveaux matériaux, la simulation quantique...
 - pour renforcer les liens entre physique et informatique pour codévelopper les matériels et logiciels du quantique.
- Soutenir des rencontres entre les GDR pour favoriser les échanges sur des thématiques ciblées, par exemple sur la caractérisation des propriétés des matériaux quantiques ou la thermodynamique classique/quantique aux petites échelles.
- Associer CNRS Physique à la section 8 « Micro- et nanotechnologies, micro- et nanosystèmes, photonique, électronique, électromagnétisme, énergie électrique » pour le futur mandat du CoNRS.
- Finaliser la création de deux laboratoires communs CNRS/entreprises sur les technologies quantiques.

Matière complexe

2023 — 2024

- Affichage par CNRS Physique d'un poste en section 11 colorié « Transport et fluctuations ioniques dans les milieux confinés ou complexes ».
- Lancement de la réflexion sur les contours des sections qui pourrait conduire à la création d'une section incluant les thématiques de la matière complexe et de la physique du vivant.
- Création de l'*International Research Laboratory* (IRL) FACTS avec l'Université de Californie à Santa Barbara, consacré à la matière condensée molle et dure.

2024 — 2025

- Soutenir les équipements en lien avec les recherches sur les métamatériaux mécaniques et les solides actifs pour développer la physique des matériaux programmables.
- Renforcer les thématiques émergentes autour de la physique des plantes en suscitant la création d'un *International Research Network* (IRN) pour animer des collaborations internationales.

Physique du vivant Physique pour la santé

2023 — 2024

- Lancement de la réflexion sur les contours des sections qui pourrait conduire à la création d'une section incluant les thématiques de la matière complexe et de la physique du vivant.
- Création, en partenariat avec Inria et l'Université Grenoble-Alpes, de l'équipe Microcosme au laboratoire LiPhy qui combine des approches informatiques et expérimentales pour l'analyse, l'ingénierie et le contrôle de la croissance des micro-organismes.
- Création, en partenariat avec l'entreprise Abbelight, du Laboratoire commun (Labcom) NanoLife au laboratoire ISMO sur la Nanoscopie 3D pour les sciences du vivant.
- Contribution de l'Institut à la rédaction, puis au lancement, de la feuille de route Santé du CNRS.
- Création, avec CNRS Ingénierie, d'une Chaire de Professeur Junior (CPJ CNRS) MecanoBio sur la biomécanique pour la santé.
- Création, en partenariat avec l'Inserm et Aix-Marseille Université, de l'équipe RNanoTher au laboratoire CINaM dédié au développement d'une nouvelle classe de nanomédecine « intelligente ».

2024 — 2025

- Réorganiser les périmètres des sections pour mieux prendre en compte les spécificités de la physique du vivant.
- Veiller à ce que les appareils et les savoir-faire soient mutualisés, et ainsi contribuer à la structuration de la communauté de la physique du vivant.
- Renforcer les relations directes entre CNRS Physique et l'Inserm pour mieux accompagner le transfert de projets des laboratoires de CNRS Physique vers la santé, et bénéficier du savoir-faire de cet organisme sur les essais cliniques et leur contexte éthique.
- Proposer l'ajout d'une réflexion sur la gestion des consommables dans la feuille de route santé du CNRS.

2023 — 2024

- Construction d'un GDR Systèmes Complexes.
- Pérennisation du soutien du CNRS à la dynamique de l'IXXI, Institut Rhônalpin des Systèmes Complexes.
- Identification et accompagnement, avec CNRS Ingénierie, du projet *Prévoir l'imprévisible*, fondé sur l'imagerie neuromorphique avec des applications au climat, financé dans le cadre du programme Recherche à Risque.
- Coordination, avec CNRS Sciences Humaines & Sociales, du groupe de travail Défis sociétaux - Territoires du futur.
- Accompagnement, en partenariat avec Inria et l'ENS de Lyon, de la création de l'équipe SEMIS au laboratoire LPENSL qui explore les interdépendances entre les sciences ou les techniques et les organisations sociales ou les écosystèmes.

2024 — 2025

- Développer les interfaces de l'Institut avec CNRS Écologie & Environnement et avec CNRS Sciences Humaines & Sociales, et en particulier identifier des sujets prometteurs.
- Proposer avec CNRS Sciences Humaines & Sociales des thématiques communes en vue d'une Chaire de Professeur Junior (CPJ CNRS) 2025 inter-instituts.
- Réfléchir à la création d'une CID « Transitions écologique et énergétique » incluant les apports de la physique à la science émergente de la durabilité.
- Inciter les GDR rattachés à CNRS Physique à identifier, le cas échéant, des questions scientifiques relatives aux transitions écologique, énergétique et climatique.
- Dresser un état des lieux des apports de la physique aux sciences de la durabilité et de la soutenabilité et les promouvoir dans nos thématiques de recherche.
- Renforcer les relations directes entre CNRS Physique et INRAE pour mieux accompagner le transfert de projets des laboratoires de CNRS Physique vers l'agriculture ou l'environnement.

Lois fondamentales

2023 — 2024

- Lancement d'un groupe de travail pour renforcer les interactions entre les Instituts CNRS Physique, CNRS Nucléaire & Particules, CNRS Terre & Univers.
- Création d'une Chaire de Professeur Junior (CPJ CNRS) KIDS4CMB sur l'étude du fond cosmologique à l'aide de détecteurs supraconducteurs à très basse température en concertation avec deux autres instituts.

- Création d'une Chaire de Professeur Junior (CPJ CNRS) PRECISION sur les mesures de précision pour la physique fondamentale.
- Participation depuis 2024 au financement du GDR Ondes gravitationnelles porté par CNRS Nucléaire & Particules.

2024 — 2025

- Réfléchir à la création d'un GDR sur les nouvelles approches de physique mathématique des hautes énergies.
- Renforcer les liens entre théoriciens des hautes énergies et expérimentateurs de basse énergie mesurant les constantes fondamentales ou testant les limites des interactions fondamentales.
- Soutenir le développement du Réseau Fibré Métrologique à Vocation Européenne (T-REFIMEVE) avec les autres instituts concernés.

Physique en régimes extrêmes

2023 — 2024

- Création de l'axe thématique "accélération laser plasma et nouveaux concepts" dans le GDR SCIPAC par une action concertée entre les Instituts CNRS Physique et CNRS Nucléaire & Particules.
- Nomination d'un Délégué Scientifique de CNRS Physique au conseil d'EuPRAXIA (European Plasma Research Accelerator with eXcellence In Applications).
- Création, en partenariat avec l'entreprise Amplitude/ALPhaNOV, du Laboratoire commun (Labcom) TRICORN au laboratoire CELIA pour analyser les matériaux pour le nucléaire.

2024 — 2025

- Mettre en place un groupe de travail sur la fusion par confinement inertiel (FCI) afin d'identifier les champs scientifiques pertinents (codes numériques, lasers, cibles...) qui permettront à CNRS Physique d'y contribuer de façon déterminante.
- Identifier les risques de pertes de savoir-faire sur le développement des instrumentations de pointe et des technologies habilitantes (cryogénie, vide...) pour prioriser les actions à mener.

Nouveaux enjeux numériques

2023 — 2024

- Lancement d'une enquête sur l'utilisation du numérique dans les laboratoires.
- Création d'une Chaire de Professeur Junior (CPJ CNRS) PhyStatIA couplant Physique Statistique et Intelligence Artificielle.

2024 — 2025

- Associer CNRS Physique à la CID 55 « Sciences et données » pour le futur mandat du CoNRS.
- Créer une fédération ou un GDR pour soutenir l'interface physique numérique/mathématiques appliquées/informatique avec des axes notamment en biophysique et matière condensée.
- Créer un groupe de réflexion pour conseiller l'Institut sur les aspects numériques de la recherche à CNRS Physique.

Culture scientifique

2023 — 2024

- Coordination de l'Année de la Physique 2023 — 2024.
- Renforcement des liens entre CNRS Physique et le milieu scolaire (enseignants et élèves) dans le cadre de l'année de la physique notamment par l'organisation de formations continues d'enseignants.
- Création d'une Action Nationale de Formation (ANF) « Clés et outils pour transmettre les avancées de la recherche aux mondes enseignant et grand-public ».
- Publication du livre « Étonnante physique » et de la bande dessinée « Ébullitions, 12 trajectoires en physique ».
- Initiative « Physique étonnante pour un grand oral percutant » mettant en lien des lycéens et des lycéennes et des scientifiques. Cette action a vocation à perdurer.
- Organisation d'une rencontre au Sénat avec parlementaires, dirigeants d'entreprise et personnalités issues du monde scientifique et académique, pour échanger sur la place de la recherche en physique.

2024 — 2025

- Créer un poste de Délégué Scientifique « Médiation et culture scientifiques » à CNRS Physique avec un rôle de coordination nationale pour fédérer les nombreuses activités de nos laboratoires dans ce domaine.
- Continuer à promouvoir la physique en pérennisant le lien établi avec l'Éducation nationale pendant l'année de la physique, via des projets avec l'Inspection Générale et plus directement avec les professeurs et les élèves de lycée.
- Nommer annuellement une ambassadrice et un ambassadeur de CNRS Physique pour effectuer des interventions à destination des élèves, des enseignants, des personnalités politiques, ou des industriels, en variant, au fil des années, les thématiques et en essayant de couvrir les différentes approches expérimentales, numériques et théoriques.
- Proposer un plan d'action pluriannuel définissant de grands événements fédérateurs et en tenir compte pour le choix des thématiques des ambassadeurs.

- Inciter physiciennes et physiciens à participer à des journées d'échanges entre scientifiques et journalistes scientifiques.
- Co-construire avec les sections du CoNRS des critères d'évaluation des activités de médiation et de dissémination en physique.

Parité et diversité(s)

2023 — 2024

- Création d'une cellule « Parité-Égalité » au sein de CNRS Physique.
- Mise en place et animation du réseau de référentes et référents parité dans les laboratoires de l'Institut.
- Mise en place d'un soutien financier au retour de congé maternité au sein de CNRS Physique.
- Accompagnement des physiciennes au travers de l'Action Nationale de Formation (ANF) « Femmes en sciences physiques » organisée par CNRS Physique.
- Nomination d'une Déléguée Scientifique « Parité - Égalité » à CNRS Physique.
- Mention systématique dans les documents de l'Institut (présentations et site internet) des indicateurs de parité.

2024 — 2025

- Suivre les indicateurs de parité des différentes catégories de personnels dans les laboratoires et au sein de l'Institut.
- Œuvrer pour augmenter le nombre de directrices des unités et des GDR.
- Financer des actions proposées par les laboratoires sur la parité-égalité.
- Encourager les femmes scientifiques (chercheuses, ingénieures, techniciennes) à intervenir en milieu scolaire.
- Inciter les intervenants en médiation, femmes ou hommes, à mettre davantage en avant la diversité des équipes.
- Sensibiliser les nouvelles recrues à la parité et aux dispositifs mis en place.
- Inciter à la généralisation de formations pour les personnels sur les VSS (violences sexistes et sexuelles).
- Sensibiliser au recrutement et à l'accompagnement des personnels en situation de handicap.
- Mener une réflexion sur l'évolution de carrière des personnels en situation de handicap.

Intégrer les enjeux environnementaux à la recherche en physique

2023 — 2024

- Création d'une cellule et d'un poste de Délégué Scientifique « Sobriété et impact

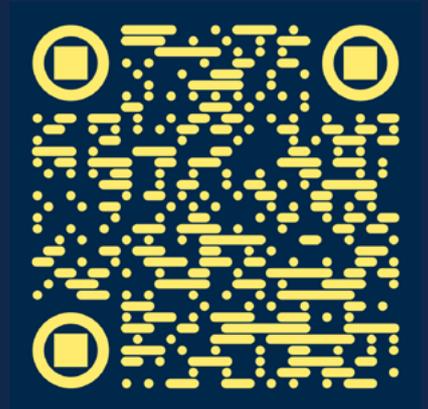
des transitions » à CNRS Physique, en lien avec le programme d'élaboration du schéma DD/RS (Développement Durable/Responsabilité Sociétale) du CNRS.

- Mise en place progressive d'un réseau de correspondantes et correspondants « Développement Durable » des laboratoires de CNRS Physique.
- Centralisation des bilans « Impact de la recherche sur l'environnement » selon la méthodologie *Labos 1point5*, des analyses et actions dans les unités pour proposer un cadre de référence et des recommandations à l'ensemble des laboratoires de CNRS Physique.

2024 — 2025

- Contribuer à l'écriture de la feuille de route développement durable du CNRS.
- Définir, via la cellule « Sobriété et impact des transitions » de CNRS Physique, un référentiel commun pour l'intégration de pratiques scientifiques plus sobres dans l'utilisation des ressources afin de minimiser l'impact environnemental de la recherche en physique.
- Inciter les GDR rattachés à CNRS Physique à une réflexion sur l'impact des transitions dans les pratiques de recherche de leur communauté.
- Réfléchir à la manière d'intégrer des critères de développement durable dans le processus de financement de la recherche et de l'innovation, en lien avec l'ensemble des agences de financement et les tutelles.





Pour consulter la version numérique



3, rue Michel-Ange
75794 Paris Cedex 16
www.inp.cnrs.fr/fr | [@CNRSphysique](https://twitter.com/CNRSphysique)